

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«___» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані
технології та системи навігації і керування»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: « Мікромеханічний гіроскоп RR типу»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПГ-61

Дмитро ЗУБАРСЬКИЙ _____

Керівник:

Асистент каф ПСОН,

Олександр САПЕГІН _____

Рецензент:

Асистент каф. ІВТ, к.т.н.

Віталій ІВАСЕНКО _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра Приладів і систем орієнтації та навігації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Надія БУРАУ
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Зубарському Дмитру Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Мікромеханічний гіроскоп RR типу

керівник проекту Олександр САПЕГІН,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. № 1180-с

2. Строк подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту Мікроелектромеханічний гіроскоп RR типу;
матеріал виготовлення Кремній, амплітуда первинних коливань до 10^0 ;
частота збуджуючого моменту приводу до 18 кГц, діапазон вимірюваний
кутових швидкостей ± 50 о/с .

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) 1. Огляд сучасних мікромеханічних датчиків кутової швидкості. Вибір конструктивної схеми гіроскопу. 2. Синтез математичної моделі мікромеханічного гіроскопу RR типу. 3. Створення тривимірної

моделі чутливого елементу гіроскопу. Розрахунок основних конструктивних параметрів 4. Створення імітаційної програмної моделі гіроскопу. Моделювання динаміки чутливого елементу при різному русі основи.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Презентація, тривимірна модель приладу 1 А1, плакати і схеми приладу та результати моделювання 3 А1.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Пошук літератури та огляд сучасних датчиків кутової швидкості.	18.05 - 22.05.2020	
2	Розробка тривимірної моделі та виконання розрахунків	25.05 - 29.05.2020	
3	Реалізація проекту у середовищі MatLab	01.06 - 05.06.2020	
4	Оформлення пояснювальної записки	08.06 - 12.06.2020	

Студент

(підпис)

Дмитро ЗУБАРСЬКИЙ
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Олександр САПЕГІН
(ініціали, прізвище)

Анотація

В даному проекті розглянуто всі теоретичні питання щодо приладу, вибрана його конструктивна схема, проведені розрахунки основних конструктивних параметрів, створена тривимірна модель, створена імітаційна програмна модель. Пояснювальна записка складає 51 сторінки, в ній міститься 25 рисунків, 1 таблиця. Гіроскопічні вимірювачі кутової швидкості призначені для вимірювання кутової швидкості обертання об'єкту (основи), на якому вони встановлені. Тому їх можна використовувати як візуальні прилади і як чутливі елементи (датчики) в системах автоматичного управління і стабілізації.

Ключові слова: мікромеханіка, гіроскоп , датчик кутової швидкості, чутливий елемент.

Аннотация

В данном проекте рассмотрены все теоретические вопросы прибора, выбранная его конструктивная схема, проведены расчеты основных конструктивных параметров, создана трехмерная модель, создана имитационная программная модель. Пояснительная записка составляет 51 страницу, в ней содержится 25 рисунков, 1 таблица. Гироскопические измерители угловой скорости предназначены для измерения угловой скорости вращения объекта (основы), на котором они установлены. Поэтому их можно использовать как визуальные приборы и как чувствительные элементы (датчики) в системах автоматического управления и стабилизации.

Ключевые слова: микромеханика, гироскоп, датчик угловой скорости, чувствительный элемент.

Abstract

In the given project all theoretical questions concerning the device are considered, its constructive circuit is chosen, the main structural parameters are recalculated, a three-dimensional model is created, a simulation software model is created. The explanatory note consists of 51 pages, 25 drawings, 1 table. Gyroscopic turn meters are intended for measuring the angular rotation of objects (bases), which they are set on. Therefore they can be used as visual devices and as pickoffs (sensors) in the systems of automatic control and stabilizing.

Keywords: micromechanics, gyroscope, sensor of angular rotation, pickoff.

Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Мікромеханічний гіроскоп RR типу»

Київ – 2020 року

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП.....	11
1.1 Типові датчики кутової швидкості	11
1.2 Мікромеханічний гіроскоп RR типу.....	17
2. МОДЕЛЬ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПУ RR ТИПУ	25
2.1 Математична модель	28
2.2 Розробка конструкції гіроскопу.....	51
2.3 Розрахунок конструктивних параметрів гіроскопу	55
3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІРОСКОПУ.....	57
3.1 Програмна модель у середовищі MatLab	57
3.2 Імпорт тривимірної моделі ММГ до Simscape Multibody	60
3.2 Результати моделювання гіроскопу.....	61
ВИСНОВОК.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	67
ДОДАДОК А	68

ВСТУП

Розробка перспективних навігаційних систем та управління об'єктами, які рухаються, мають різне призначення має зв'язок з мініатюризацією систем, зниження їхньої вартості, кращого використання енергії та витрат на використання.

Суттєве зменшення приладів навігаційних систем потребує створення малогабаритних датчиків гіроскопічного напрямлення. Пошук нових можливостей створення інерційних датчиків з необхідними характеристиками й прогрес в області мікроелектроніки привели до появи нового класу приладів – мікромеханічних гіроскопів (ММГ). У цей час питання створення й використання ММГ привертає все більшу увагу розроблювачів і споживачів малогабаритних датчиків параметрів руху.

У системах навігації, стабілізації і наведення усіх рухомих об'єктів основними датчиками первісної інформації про кутові, а інколи і про лінійні переміщення об'єкту є гіроскопічні прилади різних типів і акселерометри. З розвитком мікроелектронних технологій у дійсний час стало можливим використання їх для створення мініатюрних інерційних вимірювачів, що отримали назву мікромеханічних.

Освоєння технології виготовлення 3D механічних структур з використанням устаткування, вживаного в мікроелектроніці, відкрило шлях до створення надмініатюрних електромеханічних систем. Це новий напрям в області приладобудування отримав назву технології МЕМС (мікроелектромеханічних систем). Найбільш складними пристроями МЕМС є мікромеханічні гіроскопи (ММГ).

Кількість галузей застосування мікромеханічних інерційних датчиків надзвичайно велика. Мікромеханічні датчики первісної інформації дозволяють створювати малогабаритні інерційні навігаційні системи, 16 інтегровані із супутниковими навігаційними системами, що забезпечують необхідну точність визначення положення та орієнтації різних рухомих об'єктів: аерокосмічних літальних апаратів, морських суден, наземних транспортних засобів, робототехнічних комплексів.

До нетрадиційних застосувань мікромеханічних гіроскопічних приладів можна віднести системи віртуальної реальності (датчики первісної інформації про керуючі параметри руху оператора), інтелектуальні іграшки, самокеровані снаряди і кулі [1-3].

1. МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП

Серед мікромеханічних датчиків особливо слід відзначити датчики, які виготовлені з використанням MEMS (MicroElectroMechanicalSystems) технологій. MEMS – фотолітографічна технологія, яка дозволяє виготовляти кремнієві мікросхеми з мініатюрними механічними елементами. Вона є перспективним напрямком розвитку мікроелектроніки, оскільки з її допомогою вдається побороти обмеження, які довгий час були перепорою з мікромініатюризації деяких компонентів, які утримують механічні деталі.

1.1 Типові датчики кутової швидкості

Поплавковий двоступеневий гіроскоп

Гіротахометри – це гіроскопічні прилади для визначення абсолютної кутової швидкості основи, які зроблені на основі поплавкового двоступеневого гіроскопа. При виникненні кутової швидкості, що проектується на вісь чутливості виникає гіроскопічний момент, через що виникає до повороту гіромотора навколо вимірювальної осі. Даний кут повороту пропорційний величині кутової швидкості. Для зменшення порогу чутливості, гіродвигун двоступеневого датчика розміщують у герметичній камері, яка занурена у спеціальну рідину. Завдяки цьому можна розвантажити підшипники опор гірокамери та зменшити момент сил сухого тертя.

Часто мають місце компенсаційні датчики, споряджені «електричною пружиною» – оберненим зв'язком, –що виникає завдяки моменту, який

відповідає гіроскопічному. Напруга, що необхідна для формування моменту компенсації пропорційна величині проекції абсолютної кутової швидкості на вісь чутливості датчика кутової швидкості. На рис.1.1 приведено схему поплавкового датчика кутової швидкості.

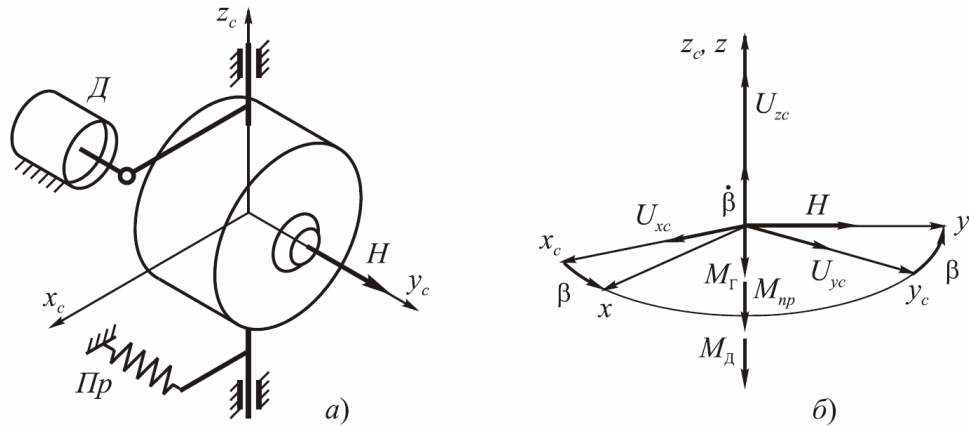


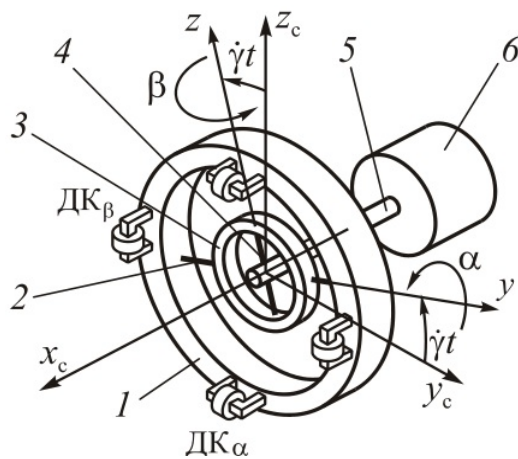
Рис.1.1. Принципова схема (а) та кінематика (б) гіротахометра

Динамічно настроєний гіроскоп

Динамічно настроєні гіроскопи (ДНГ) входять до виду вібраційних гіроскопів, які мають властивість реакції на переносну кутову швидкість типу гармонічних вібрацій. Метод динамічного налаштування полягає у використанні динамічної жорсткості обертових елементів вібраційного гіроскопу для спрощення резонансного налагоджування, чи для компенсації статичної жорсткості елементів пружного підвісу гіроскопу.

Типовими робочими характеристиками ДНГ є:

- випадковий дрейф від запуску до запуску – $0,01 \dots 1$ °/годину;
- динамічний діапазон – $10^8 \dots 10^9$ °/годину;
- діапазон перевантажень – $50 \dots 400$ g;
- діапазон вимірювання кутової швидкості – $100 \dots 1000$ °/годину;



а)

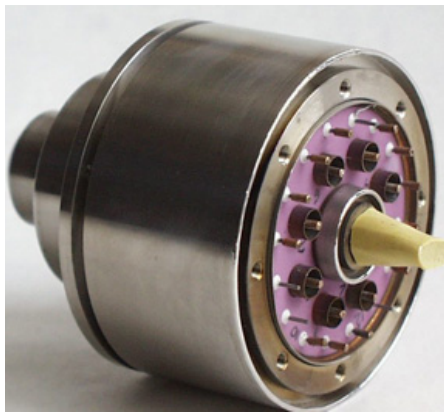


б)

Рис. 1.2 Принципова схема (а) та реальний прилад ДНГ (б)

Твердотільний хвильовий гіроскоп

Конструкцію твердотільного хвильового гіроскопу можна побачити на рис. 1.3 б). Чутливим елементом гіроскопічного приладу є резонатор – тонка напівсферична оболонка, закріплена на циліндричному стрижні. Резонатор виготовляється з матеріалів, які мають високу ізоτροпію та відзначаються добротністю (кварцового скла, синтетичного сапфіру). Головною перевагою хвильового твердотільного гіроскопа є простота конструкції і точність вимірювань. Так випадковий дрейф ТВГ становить $0,001 - 0,01$ °/годину. Використовування високої точності вимагає, крім використання матеріалів зі стабільними характеристиками, високоточної і коректної математичної моделі залежності кута хвилі від повороту резонатора; використання надійних систем генерації, підтримки коливань резонатора, зчитування інформації; постійний контроль і корекція метрологічних характеристик приладу.



а)



б)

Рис. 1.3 Твердотільний хвильової гіроскоп

Гіроскоп з електростатичним підвісом

Даний гіроскоп являється частиною області прецизійного приладобудування та можуть бути використані при виробництві та експлуатації електростатичних гіроскопів зі сферичним ротором. Гіроскоп має герметичний корпус, зроблений з струмопровідного матеріалу, сферичний ротор з нанесеним на його поверхню малюнком для оптичного датчика кута, електростатичний підвіс ротора рис.1.4.

Недоліками даного гіроскопа є мала точність і надійність. Зазначені недоліки обумовлені недосконалістю конструкції і технологічними похибками виготовлення електродів підвісу. У реальних приладах в конструкції електродів завжди присутні гострі кромки, піки шорсткості поверхні і інше. У цих місцях при подачі на електроди високої напруги порушується однорідність електростатичного поля, на гострих виступах підвищується концентрація електричних зарядів. Виникає процес їх витоку (стікання) з зазначених нерівностей на поверхню ротора. При цьому ротор отримує надлишкові електричні заряди (відбувається його зарядка), кількість яких збільшується з часом. Взаємодія електричних зарядів ротора з полем підвісу призводить до виникнення обурює моменту.

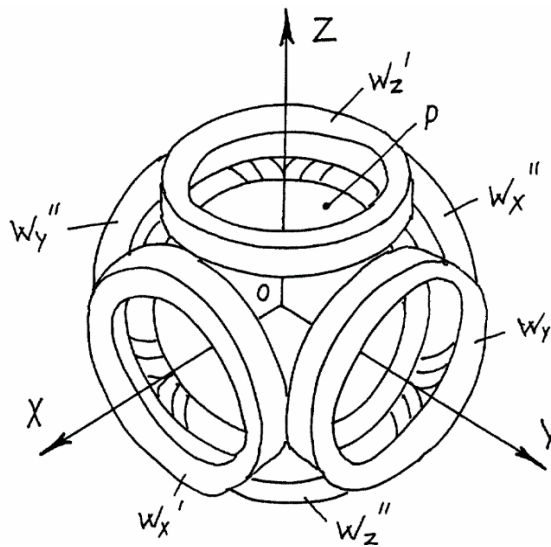


Рис. 1.4 Принципова схема гіроскопа з електростатичним підвісом

Волоконно-оптичний гіроскоп

Принцип роботи волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ) заснований на ефекті Саньяка. На рис. 1.5 представлена принципова схема такого приладу. Оптичне випромінювання від джерела, проходячи через X-розділювач потрапляє на вхід інтегрально-оптичної схеми, розділяється на два промені, які розповсюджуються по волоконно-оптичному контуру у зустрічних напрямках. Якщо контур знаходиться в спокої, різниця фаз між променями відсутня ($\Delta\varphi_s = 0$). При обертанні контуру щодо системи відліку виникає різниця фаз $\Delta\varphi_s$ пропорційна кутовій швидкості швидкості обертання ВОГ. Зміна різниці фаз призводить до зміни потужності випромінювання фіксується на фотоприймачеві.

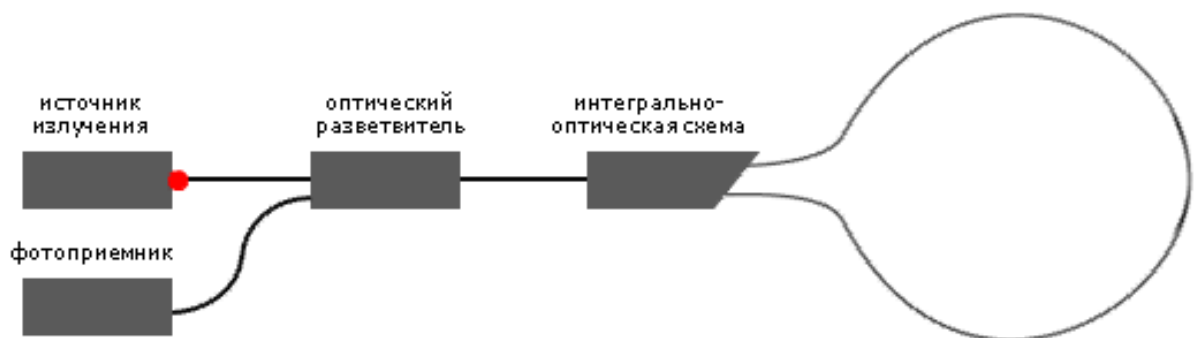


Рис. 1.5 Принципова схема ВОГ

Кільцевий лазерний гіроскоп

Кільцевий лазерний гіроскоп (КЛГ), наряду з ВОГ, є найрозповсюдженішим датчиком кутової швидкості для інерціальної навігації, рис.1.6.

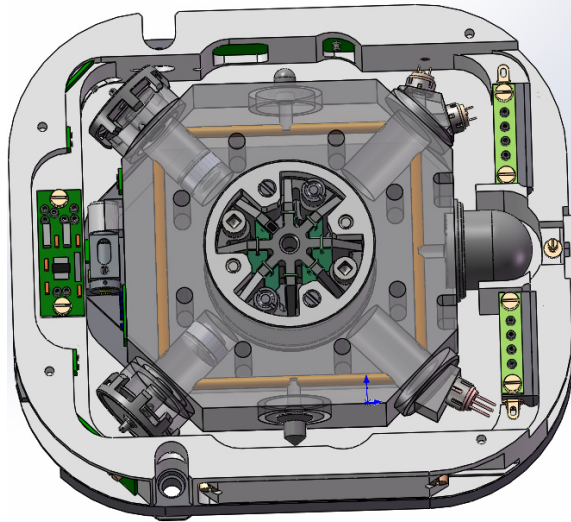


Рис.1.6. Кільцевий лазерний гіроскоп

Фізичний принцип роботи КЛГ також заснований на використанні ефекті Саньяка. Два промені генеруються в резонаторі лазерного гіроскопа і, якщо прилад обертається, то відбувається генерація хвиль різної частоти для різних напрямків через різної довжини резонатора для різних напрямків обходу, викликані обертанням.

Резонатор лазерного гіроскопа може бути досить складним, але зазвичай це – кільцевої резонатор з трьома або чотирма дзеркалами, резонатор може бути виконаний як моноблочна конструкція, так і складатися з окремих елементів. Часто резонатор виконується в формі трикутника або квадрата. Розмір гіроскопа може бути від декількох сантиметрів до декількох метрів.

Мікромеханічні гіроскопи

В останні роки мікромеханічні інерціальні датчики на базі MEMS (мікроелектромеханічні системи) технологій стають об'єктом все більш пильної уваги як з боку розробників інерціальних вимірників, так і з боку споживачів цієї продукції. Привабливими якостями цих приладів, що визначили їх унікально швидкий розвиток, є надзвичайно низька вартість, висока надійність і гранично малі габарити, що досягаються переважно за рахунок використання групових технологій мікроелектроніки, адаптованих до виготовлення мікромеханічних пристроїв.

Як правило в якості датчика кутової швидкості недорогих систем орієнтації застосовується мікромеханічні гіроскопи (ММГ). Мікромеханічний гіроскоп призначений для вимірювання кутової швидкості і являє собою інтегрований пристрій з розмірами в декілька міліметрів, що складається з механічного чутливого елемента і електронних систем управління.

1.2 Мікромеханічний гіроскоп RR типу

У ММГ з обертовими рухами RR-типу з використанням, як правило, гребінчастих двигунів створюється момент, який збуджує кутові ПК ІТ із заданою відносною кутовою швидкістю. При дії по ортогональній осі переносний кутовий швидкості підстави виникає момент сил інерції Коріоліса, що викликає кутові ВК ІТ. Напрямок дії моменту сил інерції Коріоліса визначається напрямом вектора гіроскопічного моменту і перпендикулярно площині розташування векторів відносної і переносної кутових швидкостей.

Очевидним достоїнством схем RR-типу є нечутливість до поступальної вібрації в порівнянні зі схемами LL-типу, проте має місце чутливість до кутових прискорень. Використання схем RR-типу дозволяє створювати низькочастотні осцилятори, що збільшує чутливість ММГ до вимірюваної кутової швидкості. Як і в разі ММГ з поступальною ходою ІТ,

амплітуда виникають кутових ВК пропорційна вимірюваної кутової швидкості, а частота збігається з частотою порушуваних відносних ПК. Кінематичні схеми з обертовими рухами ІТ можуть бути виконані у вигляді карданних або стрижневих підвісів з пружними елементами різної конфігурації.

Обидва види підвісів можуть бути зовнішніми або внутрішніми, тобто розміщеними всередині або поза ІТ (рис. 1.7). У конструкціях гіроскопів RR-типу можуть бути присутніми додаткові рамки. Для карданного підвісу ПК можуть порушуватися як по внутрішньої осі кардана (тільки ІТ), так і по зовнішній осі кардана (ІТ спільно з рамкою). При цьому відповідно ВК виникають по зовнішньої або внутрішньої осі.

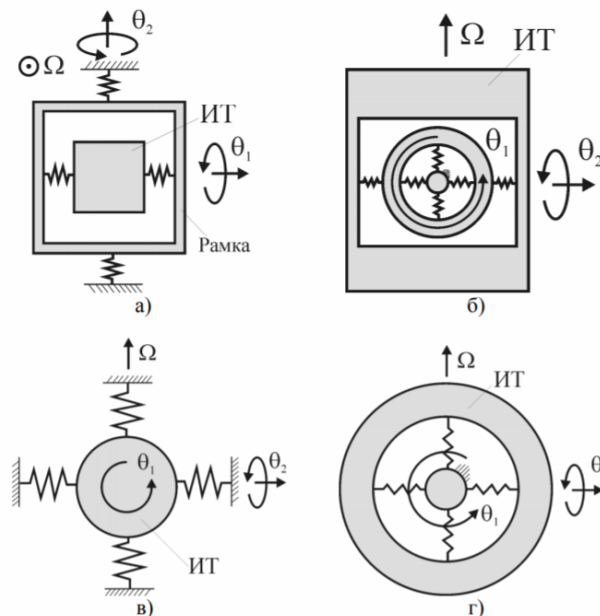


Рис. 1.7. Принципові схеми ММГ RR-типу: а) з зовнішнім кардановим підвісом; б) з внутрішнім кардановим підвісом; в) з зовнішнім стрижневим підвісом; г) з внутрішнім стрижневим підвісом

Однією з перших конструктивних схем ММГ, запропонованої DraperLaboratory, є схема в вигляді двухосного зовнішнього карданова підвісу (рис. 1.7, а). Конструкція складається з внутрішньої і зовнішньої рамок, пов'язаних один з одним і з підставою пружними елементами.

Внутрішня і зовнішня рамки мають кутові ступені свободи (RR-гіроскоп). Електростатичні датчики через систему електродів збуджують кутові коливання внутрішньої рамки і повідомляють їй змінний кінетичний момент. При обертанні підстави щодо осі, перпендикулярної площині підвісу, виникають кутові коливання зовнішньої рамки.

Амплітуда вторинних коливань є мірою кутової швидкості і вимірюється датчиком місткості, розташованим під рамкою. Для збільшення кінетичного моменту на внутрішній рамці зверху і знизу за допомогою складальних операцій закріплені ІТ (рис. 1.8).

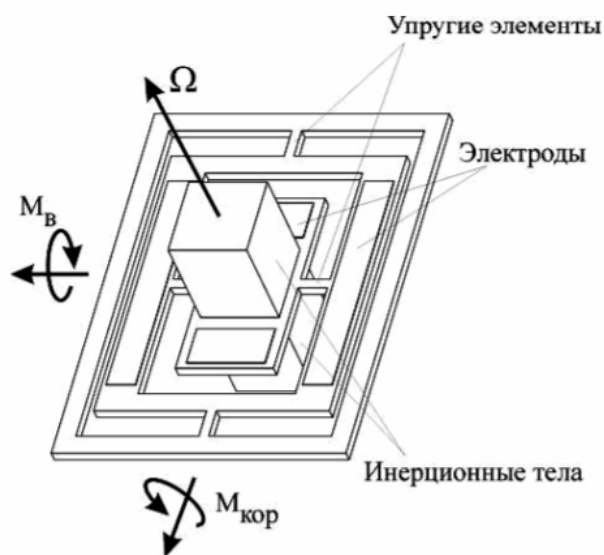


Рис. 1.8. Конструкція з зовнішнім кардановим підвісом.

Розроблений підвіс мав габарити в площині підвісу 3,6-6,6 мм і виконаний з кремнію, а ІТ виготовлені з вольфраму з питомою вагою в 2 рази більше, ніж у сталі. Залежно від перетину пружних елементів для формоутворення підвісу використовувалося анізотропне або плазмохімічне травлення. Прилад досліджувався в двох модифікаціях - з власними частотами ПК 500 Гц і 3 кГц.

До недоліків такої схеми можна віднести необхідність застосування складальних операцій для закріплення ІТ, що значно ускладнює технологічний процес виготовлення ММГ і є серйозним джерелом

нестабільності. Конструкція з внутрішнім карданним підвісом була реалізована німецькому інституті HSG-IMIT (Institute of Micromachining and Information Technology), в якому був розроблений ММГ під назвою MARSRR (Micromachined Angular Rate Sensor).

Така схема дозволяє виключити вплив пристрої збудження первинних коливань безпосередньо на ІТ (рис. 1.9). Гіроскоп виготовлений з використанням технології Bosch і являє собою прямокутну рамку з ІТ, має пружний зв'язок з внутрішнім кільцем.

Внутрішнє кільце, пов'язане з підставою пружними елементами, являє собою ротор «гребенчатого» двигуна. Електростатичний двигун створює вимушені кутові коливання внутрішнього кільця разом з зовнішньою прямокутною рамкою. При наявності переносної кутової швидкості у напрямку розташування ІТ внаслідок сил інерції Коріоліса виникають кутові коливання зовнішньої рамки по осі, перпендикулярної напрямку кутової швидкості. Амплітуда кутових коливань рамки вимірюється ємнісними датчиками, електроди яких розташовані під ІТ.

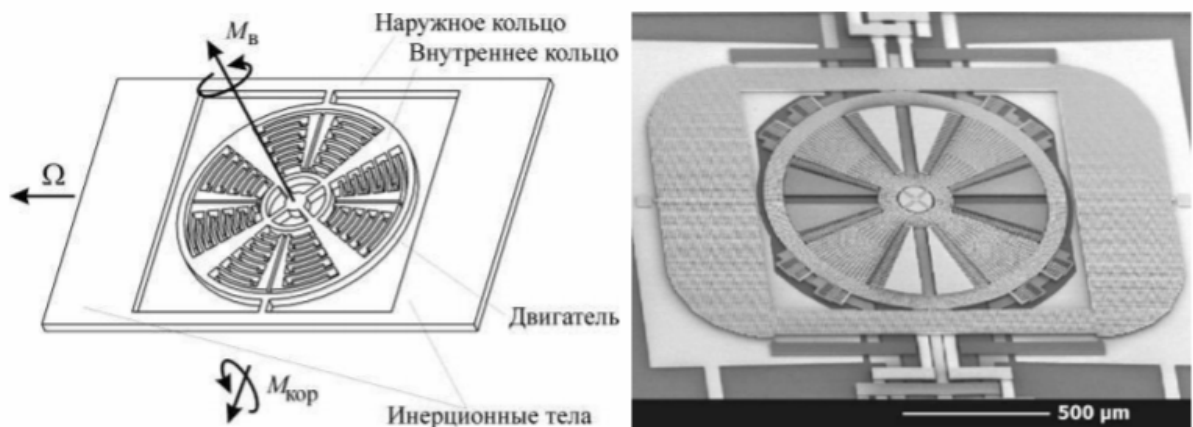


Рис. 1.9. Мікромеханічний гіроскоп MARS-RR: а) принципова схема, б) загальний вигляд гіроскопа

Нестабільність швидкості дрейфу такого ММГ становить 65 град / ч при смузі пропускання 50 Гц, стабільність масштабного коефіцієнта 0,3%, власна частота первинних коливань становить 1 420 Гц. Гіроскоп працює при

вакуумуванні внутрішньої порожнини до тиску 0,01 мбар. Надалі HSG-IMIT на основі гіроскопа MARS-RR створив інерційний блок DAVED (Decoupled Angular Velocity Detector) для використання в діапазоні високих швидкостей. Конструкції зі стрижневими підвісами дозволяють реалізувати кутові переміщення ІТ за двома ступенями свободи, причому ІТ, як правило, виконується у вигляді диска (ротора).

Відмітна особливість таких схем в порівнянні зі схемами з карданными підвісами полягає в тому, що як при первинних, так і при вторинних кутових коливаннях ІТ у вигляді жорсткого диска деформації піддаються всі пружні елементи (стержні) підвісу, але при різних схемах навантаження і при різних співвідношеннях между деформаціями крутіння і вигину.

Перевагою таких схем, як і схеми гіроскопа MARS-RR, є те, що кріплення до основи ІТ через УП здійснюється в одній центральній точці. Це мінімізує механічні напруги при виготовленні і значно знижує теплові деформації конструкції, особливо при розходженні температурних коефіцієнтів розширення матеріалів підстави і пластини з пружним підвісом. Одна з таких конструкцій розроблена Draper і показана на рис. 1.10. Схема гіроскопа у вигляді диска, що здійснює первинні і вторинні кутові коливання, має зовнішнє кільце, підвішене на внутрішньому пружному підвісі.

Порушення ПК виконується гребінчастим двигуном навколо осі, перпендикулярної площині диска. При наявності переносної кутової швидкості підстави, що лежить в площині диска, виникає момент сил інерції Коріоліса, що приводить до коливань диска навколо ортогональної осі. Ці коливання вимірюються електродами ємнісного датчика, розташованого під диском.

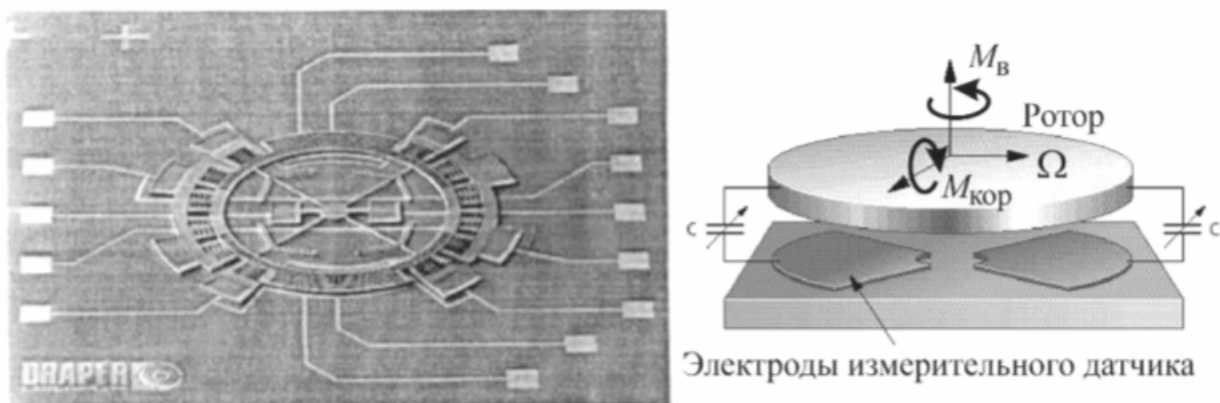


Рис. 1.10. Гіроскоп з дисковим IT DraperLaboratory (США): а) загальний вигляд, б) принципова схема

Чотири стрижня підвісу прикріплені з одного боку до диска, а з іншого - до жорсткого центру. Жорсткий центр, в свою чергу, на двох стрижнях закріплений на підставі.

Перша група стрижнів, пов'язана з диском і центром, реалізує вісь первинних кутових коливань; друга група, пов'язана з центром і підставою, реалізує вісь вторинних кутових коливань. Аналогічна конструкція була розроблена фірмою BoschGmbH (Німеччина) і представлена на рис. 1.11. Конструкція гіроскопа складається з ІТ у вигляді диска, з'єднаного в центральній частині з підставою з допомогою двох стержнів прямокутного перетину. Диск має зубці для освіти рухомої частини гребенчатого електростатичного двигуна і здійснює первинні кутові коливання щодо осі, перпендикулярної площині диска. Вплив кутової швидкості підстави в площині диска призводить до вторинних кутовим коливанням диска на частоті первинних коливань. Вимірювання вторинних коливань здійснюється з використанням електродів ємнісного датчика, розташованого під диском.

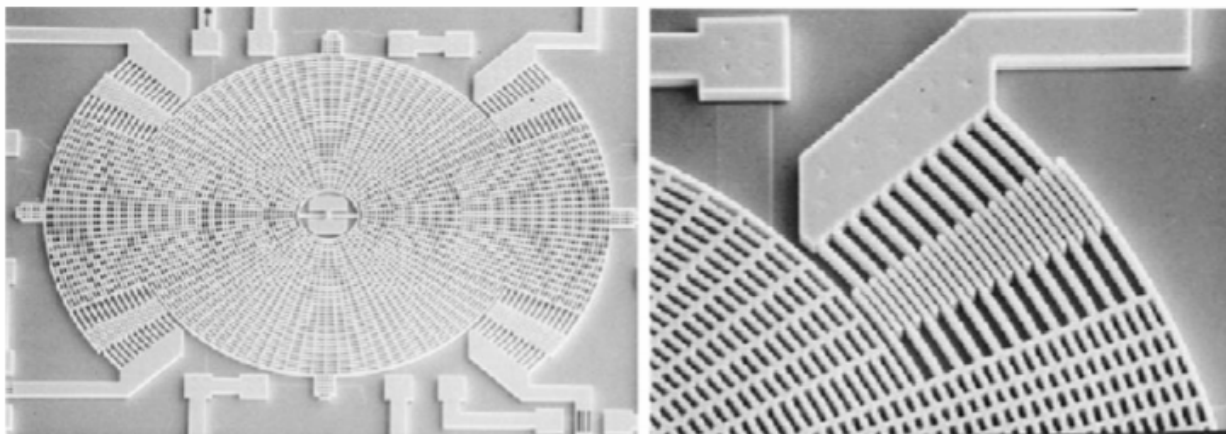


Рис. 1.11. Разработка гіроскопа фірми BoschGmbH (Німеччина). а) загальний вигляд, б) гребінчастий двигун

Для того, щоб вторинні кутові коливання диска відбувалися навколо потрібної осі, екваторіальні моменти інерції диска повинні бути нерівними одне одному, а пружний підвіс повинен володіти необхідною пружною анізотропією для забезпечення кутових коливань по необхідній координаті і для виключення взаємного впливу коливань по іншим координатам. Приклад конструкції ММГ RR-типу розробки ЦНДІ «Електроприлад» як одноосного вимірювача кутової швидкості схематично представлений на рис. 1.12.

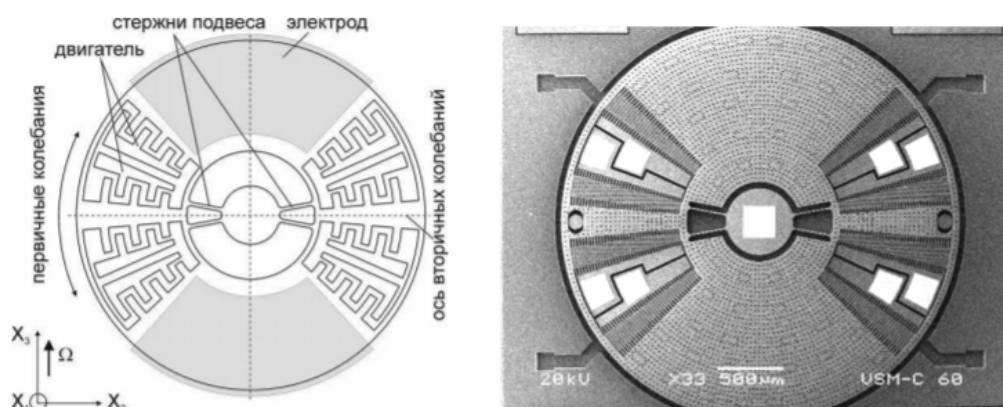


Рис.1.12. Конструкція гіроскопа ЦНДІ «Електроприлад» а) принципова схема, б) загальний вигляд

Нерівність екваторіальних моментів інерції диска забезпечується вирізами, в яких розміщені електростатичні двигуни збудження і ємнісні датчики первинних кутових коливань. Первинні коливання збуджуються в площині диска, а вторинні вимірюються електродами ємнісного датчика, розташованого під диском.

Незважаючи на відмінності технологічних процесів, які використовуються для реалізації приладів на рис. 1.9-1.12, схеми побудови є загальними і містять диск з нерівними екваторіальними моментами інерції, внутрішній стрижневий підвіс і електроди ємнісного датчика, розташовані під диском. Незначні відмінності конструкцій складаються в розташуванні стрижнів підвісу і конфігурації елементів гребінчатого двигуна.

2. МОДЕЛЬ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ГІРОСКОПУ RR ТИПУ

Точність гіроскопа зазвичай визначається найважливішим параметром - стабільністю зміщення. Стабільність зміщення являє собою точність виходу датчика при відсутності обертання протягом всього терміну служби. В ідеалі стабільність зміщення повинна бути дорівнює 0, але в реальних умовах досягнення такої точності неможливо внаслідок похибок виготовлення самого датчика (неузгодженість, шум, старіння і ін.), А також впливу умов і середовища на вимірювання (температурні коливання, вібрації, лінійні прискорення і ін.).

Інші важливі характеристики гіроскопів включають:

- Кутовий випадковий догляд / шум.
- Нестабільність зміщення.
- Помилка або дрейф зміщення гіроскопа - загальна або під впливом конкретних факторів, наприклад температури.
- Власне зміщення - вихід гіроскопа за відсутності обертання.
- Вимірювальний діапазон.
- Температурна чутливість.
- Чутливість до вібрації, прискорення і ударам.
- Старіння.

Чутливість гіроскопа також залежить від різних дрейфів, що знаходять відображення в специфікаціях. Гіроскопи схильні власним шумів і впливу невіривнювання осей, але прийняття до уваги цих параметрів, як і ряду інших, є вторинною завданням.

Нестабільність зміщення або стабільність описує, як зміщення змінюється в часі. У специфікаціях виробників стабільність зміщення зазвичай специфікується як 1σ значення в $^{\circ} / \text{ч}$ для більш точних або в $^{\circ} / \text{с}$ для менш точних приладів.

Таблиця.1. Ключові характеристики мікромеханічних гіроскопів

Параметр	Опис	Найкращі характеристики МЕМС-гіроскопів
Нестабільність зміщення	Найменше значення на кривій Аллана при кімнатній температурі при відсутності вібрацій та ударів	$<0,1^{\circ}/\text{ч}$
Кутовий випадковий відхід (шум) ARW	Метод Аллана	$<0,01^{\circ}/\sqrt{\text{ч}}$
Дрейф зміщення під впливом температури	Повний температурний діапазон	$5^{\circ}/\text{ч}$
Дрейф зміщення під впливом вібрації	Повний діапазон вібраційного впливу	
Дрейф зміщення під впливом прискорення	Повний діапазон впливу прискорення	
Стабільність зміщення (in-run)	Квадратична сума попередніх дрейфів в залежності від умовної експлуатації	$1-5^{\circ}/\text{ч}$
Зміщення	Вихід при нульовій швидкості	$30^{\circ}/\text{ч}$
Зміщення під впливом ударів		
Старіння		
Стабільність зміщення (run-to-run)	Квадратична сума попередніх дрейфів в залежності від умов експлуатації	$5-30^{\circ}/\text{ч}$

Нестабільність зміщення в більшості специфікацій визначається виробниками як найкраща характеристика, досягнута гіроскопом в лабораторних умовах. Нестабільність зміщення визначається як мінімальна точка на кривій Аллана і використовується для характеристики гіроскопа, визначення якої проводиться при кімнатній температурі і за відсутності впливів вібрацій і ударів. Нестабільність зміщення in-run розраховується в межах одного випробувального циклу, а run-to-run - за результатами декількох циклів тестування.

У більш загальному випадку стабільність зміщення (in-run або run-to-run) характеризує роботу гіроскопа в реальних умовах і в більшій мірі залежить від того, який фактор середовища впливає на роботу датчика - температура або, наприклад, старіння.

Крім абсолютної точності, в розрахунок може прийматися відносна точність, яка визначається як відношення стабільності зміщення до вимірювального діапазону і виражається у відсотках, коли мова йде про датчиках для споживчого або high-end сегмента, або в ppm і ppb для датчиків з розряду high-end.

Кутовий випадковий догляд (випадкове блукання кута) (AngleRandomWalk, ARW) - це сигнальний шум стаціонарного (за відсутності обертання) гіроскопа після інтегрування (на відміну від стабільності зміщення, яка вимірюється до інтегрування сигналу орієнтації). Значення ARW дається в специфікаціях виробника в $^{\circ} / \sqrt{ч}$ або $^{\circ} / \sqrt{с}$. Ця помилка тим вище, тим довше час інтегрування. Кутовий випадковий шум ARW також безпосередньо витягується з кривою Аллана.

Нестабільність зміщення і кутової випадковий шум (ARW для гіроскопа) - два основних джерела похибок MEMСкомпонентів, які в першу чергу беруться до уваги. При комплексному аналізі необхідно взяти до уваги чинники впливу зовнішнього середовища і умов праці, тобто всіх параметрів, перерахованих вище.

Внаслідок цього специфікації сучасних high-end гіроскопів є досить розрізнені дані для аналізу, які не завжди можуть бути абсолютно уніфіковані і безпосередньо зіставлені.

Середні цифри найкращих значень для сучасних MEMS-гіроскопів згідно з останніми публікаціями виробників представлені в таблиці.

2.1 Математична модель

Схема мікромеханічного гіроскопу RR типу.

Гарнимваріантом для конструювання даного гіроскопа є дисковий мікромеханічний гіроскоп (рис. 2.1).

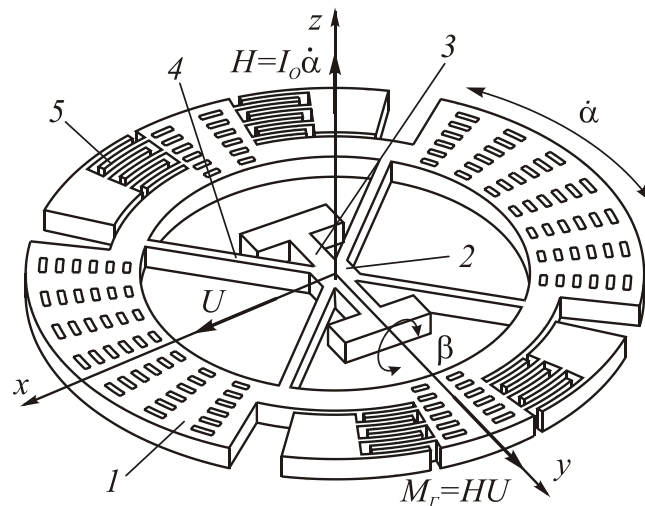


Рис. 2.1. Мікромеханічний гіроскоп RR типу

На даному рисунку кутові рухи диска 1 навколо осі звиникають завдяки гребінчастому двигуну 5 на частоті, яка дорівнює частоті власних кутових коливань. При кутовій швидкості основи з'являються сили Коріоліса, що спричиняють коливання диска по осі y , перпендикулярній його відносній швидкості та переносній кутовій швидкості основи U . Вихідний рух кільця впливають на розташовані нижче нього пластини конденсаторного датчика руху.

Для знаходження рівнянь руху будемо зважати на кінцеву жорсткість торсіонів на кручення і вигинта приймемо до уваги, що вібрації, лінійне

прискорення та поступальне зміщення впливають на основу з переносним крученням.

Знайдемо потрібні системи координат (рис. 2.2). Система координат OXYZ має відношення до корпусу. Спочатку треба мати на увазі поздовжні осі пружних елементів, які співпадають з осями OX, OY. Основа обертається

з кутовими швидкостями Ω_x, Ω_y поступово змінює місце положення разом з

лінійними прискореннями a_x, a_y, a_z (маючи на увазі a_z , у яке входить

прискорення сили тяжіння) та може мати вібрації лінійного характеру, який

можна спостерігати у вигляді зміщень вібраційного характеру x_B, y_B, z_B по

відповідним осям.

Через пружних рух підвісу його геометричний середина від точки O робить переміщення в точку O_1 , координати якої x, y, z . Осі системи

координат $O_1x' y' z'$ паралельні відповідним осям OXYZ. Вигляд системи

координат O_1xyz , має зв'язок з ротором, відносно системи координат $O_1x'y'z'$

z' знайдено за кутами γ, α, β , послідовні повороти мають визначення системи

координат $O_1x_2y_2z_2, O_1x_1y_1z_1$, та O_1xyz . Позиція центральної маси ротора в

точці O_0 має відношення до даних $\delta x, \delta y$ в площині xy . Осі системи

координат $O_0x_0y_0z_0$ мають паралельне відношення до відповідних осей

системи координат O_1xyz .

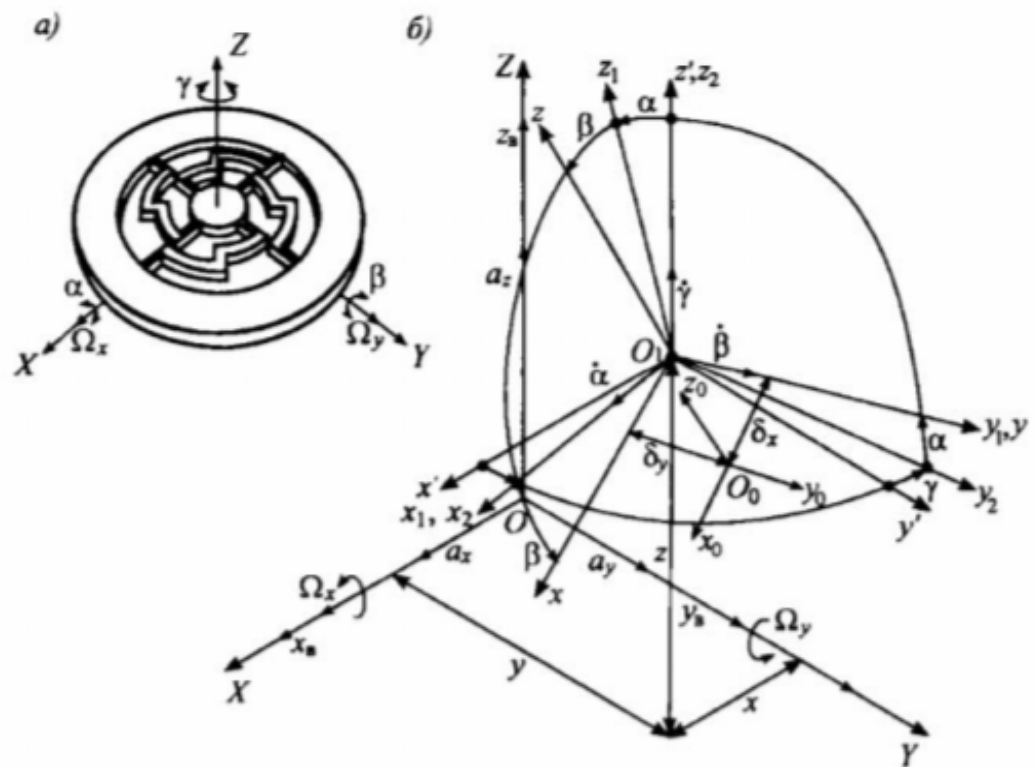


Рис. 2.2. Мікромеханічний гіроскоп RR-типу: а) кінематична схема; б) система координат

Рівняння руху гіроскопа отримаємо, прийнявши за основні координати в рівняннях Лагранжа величини $\alpha, \beta, \gamma, x, y, z$.

Маємо на увазі, що маючи невеликі значення $\delta x, \delta y$, якщо подивитися

на геометричними величини ротора і підвісу головні (відносно осей системи

координат O_1xyz) і головні центральні (відносно осей системи координат

$O_0x_0y_0z_0$) моменти інерції ММГ мають відповідне значення точності значення

$m\delta_x^2$ і $m\delta_y^2$ (m - маса ротора).

Вираз для кінетичної енергії ММГ має вигляд:

$$T = [A_2 p_2^2 + B_2 q_2^2 + C_2 r_2^2 + A_1 p_1^2 + B_1 q_1^2 + C_1 r_1^2 + \\ + m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)] / 2, \quad (2.1)$$

де A_1, B_1, C_1 – головні моменти інерції ротора;

A_2, B_2, C_2 – головні моменти інерції елементів підвісу, що переміщуються разом з ротором за координатами α, β, γ ;

$p_2, q_2, r_2; p_1, q_1, r_1$ – проекції абсолютних кутових швидкостей на осі

систем координат $O_1x_1y_1z_1$ і O_1xyz відповідно;

v_x, v_y, v_z – проекції абсолютної лінійної швидкості ЦМ на відповідні осі. Потенційна енергія ММГ і дисипативна функція розсіювання енергії виглядають так:

$$\Pi = (G_\alpha \alpha^2 + G_\beta \beta^2 + G_\gamma \gamma^2 + G_x x^2 + G_y y^2 + G_z z^2) / 2 + W;$$

$$\Phi = (b_\alpha \alpha^2 + b_\beta \beta^2 + b_\gamma \gamma^2 + b_x x^2 + b_y y^2 + b_z z^2) / 2, \quad (2.2)$$

де $G_\alpha, G_\beta, G_\gamma, G_x, G_y, G_z$ – жорсткості підвісу по відповідним узагальненим

координатам.

Проекції абсолютних кутових швидкостей мікромеханічного гіроскопа мають вигляд:

$$p_2 = \dot{\alpha} + \Omega x \cos \gamma + \Omega y \sin \gamma ;$$

$$q_2 = \Omega y \cos \gamma - \Omega x \sin \gamma ;$$

$$r_2 = \dot{\gamma};$$

$$p_1 = \dot{\alpha} \cos \beta + \Omega x \cos \gamma \cos \beta + \Omega y \sin \gamma \cos \beta - \dot{\gamma} \cos \alpha \sin \beta;$$

$$q_1 = \dot{\beta} + \dot{\gamma} \sin \alpha + \Omega y \cos \gamma \cos \alpha - \Omega x \sin \gamma \cos \alpha ; \quad (2.3)$$

$$r_1 = \dot{\gamma} \cos \alpha \cos \beta + \dot{\alpha} \sin \beta + \Omega x \cos \gamma \sin \beta + \Omega y \sin \gamma \sin \beta.$$

Координати центральної маси можна визначити за допомогою :

$$X = x + x_B + \delta x \cos \beta \cos \gamma - \delta y \cos \alpha \sin \gamma ;$$

$$Y = y + y_B + \delta y \cos \alpha \cos \gamma + \delta x \cos \beta \sin \gamma ;$$

$$Z = z + z_B + \delta z \sin \alpha - \delta x \sin \beta \cos \alpha ,$$

а абсолютні лінійні швидкості центральної маси за координатами мають відношення з похідними за часом:

$$v_x = \dot{X} , v_y = \dot{Y} , v_z = \dot{Z} . \quad (2.4)$$

Маючи кінетичну енергію за формулою (2.1) маючи на увазі (2.3), (2.4), зробивши диференціювання за рівнянь Лагранжа другого роду (2.5):

$$d(\partial T / \partial \dot{q}_j) / dt - \partial T / \partial q_j = Q_j, j = 1 \dots 5, \quad (2.5)$$

по головним координатам і швидкостям, і визначивши головні сили маючи на увазі (2.2) та маючих вплив на ММГ прискорень, знаючи, що значення $\alpha, \beta, \gamma, x, y, z$ невеликі і $\dot{\gamma} \gg \Omega x, \Omega y$, рівняння руху гіроскопу треба

зробити вигляду :

$$(A_2 + A_1) \ddot{\alpha} + b_{\alpha} \dot{\alpha} + [G\alpha - (B_1 + B_2 - C_1 - C_2) \gamma^2] \alpha - (A_1 + B_1 - C_1) \dot{\gamma} \beta =$$

$$-(C_2 + B_2 - A_2 + C_1 + B_1 - A_1) \dot{\gamma} \Omega_y - (A_1 + A_2) \Omega \dot{x} - m(\ddot{z} + \ddot{z}_B) \delta_y + m a_z \delta_y -$$

$$-\partial W / \partial \alpha ;$$

$$B_1\ddot{\beta} + b_\beta\dot{\beta} + [G_\beta + (C_1 - A_1)\gamma^2]\beta + (A_1 + B_1 - C_1)\dot{\gamma}\dot{\alpha} = -(C_1 + B_1 - A_1)\dot{\gamma}\Omega x$$

$$- B_1\Omega_y + m(\ddot{z} + \ddot{z}_B)\delta_x - ma_z\delta_z - \partial W / \partial \beta ; \quad (2.6)$$

$$C_1\ddot{\gamma} + (b_\gamma + A_1\Omega_x\alpha + B_1\Omega_y\beta)\dot{\gamma} + G_\gamma\gamma = M_0\sin pt + m[(\ddot{x} + \ddot{x}_B)\delta_y -$$

$$- (\ddot{y} + \ddot{y}_B)\delta_x] + m(a_y\delta_x - a_x\delta_y);$$

$$m\ddot{x} + b_x\dot{x} + (Gx - m\gamma^2)x - 2m\dot{y}\dot{\gamma} = m(a_x - \ddot{x}_B + \delta_y\ddot{\gamma}) - \partial W / \partial x ;$$

$$m\ddot{y} + b_y\dot{y} + (Gy - m\gamma^2)y - 2m\dot{x}\dot{\gamma} = m(a_y - \ddot{y}_B - \delta_x\ddot{\gamma}) - \partial W / \partial y ; \quad (2.7)$$

$$m\ddot{z} + b_z\dot{z} + G_z z = m(a_z - \ddot{z}_B - \delta_y \ddot{\alpha} + \delta x_\beta) - \partial W / \partial z ,$$

де $b_\alpha, b_\beta, b_\gamma, b_x, b_y, b_z$ – коефіцієнти демпфірування за відповідними

координатами;

M_0, p – амплітуда і частота моменту двигуна (вібропривід) по координаті γ .

Рівняння (2.6), (2.7) показують рух гіроскопуза шістьмаголовними координатами використовуючи масоінерціонунесиметрію ротора і підвісу, і збурень, обумовлених лінійним і кутовим переносним рухом основи.

Маючи конструкції мікромеханічного гіроскопу RR-типу маса ротора на декілька порядків має більше значення за масу підвісу, тому припустимо, що $A_2 = B_2 = C_2 = 0$.

Коли $\delta_x = \delta_y = 0$ рівняння руху буде мати вигляд :

$$A_1 \ddot{\alpha} + b_\alpha \dot{\alpha} + [G_\alpha + (C_1 - B_1) \gamma^2] \alpha - (A_1 + B_1 - C_1) \dot{\gamma}_\beta =$$

$$= -(C_1 + B_1 - A_1) \dot{\gamma} \Omega y - A_1 \Omega x - \partial W / \partial \alpha;$$

$$B_1 \ddot{\beta} + b_\beta \dot{\beta} + [G_\beta + (C_1 - A_1) \dot{\gamma}^2] \beta + (A_1 + B_1 - C_1) \dot{\gamma} \dot{\alpha} =$$

$$= -(C_1 + B_1 - A_1) \dot{\gamma} \Omega x - B_1 \Omega y - \partial W / \partial \beta; \quad (2.8)$$

$$C_1 \ddot{\gamma} + (b_\gamma + A_1 \Omega_x \alpha + B_1 \Omega_y \beta) \dot{\gamma} + G_\gamma \gamma = M_0 \sin pt$$

$$m \ddot{x} + b_x \dot{x} + (G_x - m \dot{\gamma}^2) x - 2m y \dot{\gamma} = m(a_x - \ddot{x}_B) - \partial W / \partial x;$$

$$m \ddot{y} + b_y \dot{y} + (G_y - m \dot{\gamma}^2) y + 2m x \dot{\gamma} = m(a_y - \ddot{y}_B) - \partial W / \partial y; \quad (2.9)$$

$$m\ddot{z} + b_z\dot{z} + G_z z = m(a_z - z_B) - \partial W / \partial z \quad (2.10)$$

Системи рівнянь (2.8), (2.9) і рівняння (2.10) є незалежними.

Використавши рівняння (2.8), де не беремо до уваги члени $(A_1 + B_1 - C_1)\dot{\gamma}\dot{\beta}$ та

$(A_1 + B_1 - C_1)\dot{\gamma}\dot{\alpha}$, тому що їх вплив можна побачити через

спричинені коливання на подвоєній частоті по відношенню до частоти первинних коливань з амплітудою, на кілька порядків меншою амплітуди коливань, які мають обчислення швидкостями.

Маємо на увазі, що моменти гіроскопу в правих частинах рівнянь (2.8)

мають більше значення моментів $A_1\dot{\Omega}_x$ і $B_1\dot{\Omega}_y$, тож можемо не враховувати

вплив електро-статичних сил, тоді візьмемо до уваги, що $J\alpha = A_1$, $J\beta = B_1$, $J\gamma =$

$C_1, J\alpha = -A_1 + B_1 + C_1$ та будемо мати запис системи (2.8), рівняння якої

стануть незалежними :

$$J_\alpha \ddot{\alpha} + b_\alpha \dot{\alpha} + C_\alpha \alpha = J_0 \dot{\gamma} \Omega_y; \quad (2.11)$$

$$J_\beta \ddot{\beta} + b_\beta \dot{\beta} + C_\beta \beta = J_0 \dot{\gamma} \Omega_x; \quad (2.12)$$

$$J_\gamma \ddot{\gamma} + b_\gamma \dot{\gamma} + C_\gamma \gamma = M_B(t), \quad (2.13)$$

де

$$M_B(t) = M_0 \sin pt; \quad C_\alpha = G_\alpha + (C_1 - B_1) \gamma^2; \quad C_\beta = G_\beta + (C_1 - A_1) \gamma^2 \quad (2.14)$$

У рівняннях (2.11), (2.12) жорсткості C_α , C_β відповідно до рівняннями

(2.8) будують через жорсткості торсіонів G_α , G_β та окремих

квазіпружних жорсткостей, пропорційних величині γ^2 .

Маючи на увазі квазіпружні жорсткості частоти власних коливань мікромеханічного гіроскопу координатам на виході можемо знайти за формулою :

$$\omega_{\alpha 0} = \sqrt{G_{\alpha}^* / A_1}; \quad \omega_{\beta 0} = \sqrt{G_{\beta}^* / B_1}. \quad (2.15)$$

При немалих за значенням $\dot{\gamma}$ частоти (2.15) можуть мати значно інше

значення не беручи до уваги квазіпружні жорсткості [3].

Положення основи, маючи на увазі лінійну вібрацію.

Треба проаналізувати вплив лінійної вібрації основи на ММГ з нерівножорстким пружним підвісом.

На рис. 2.3 можна побачити вигляд мікромеханічного гіроскопу з первинними коливаннями по осі OZ, (координата γ) і вторинними відносно осі OX (вихідна координата α). Кутова швидкість, яка вимірюється – Ω_y .

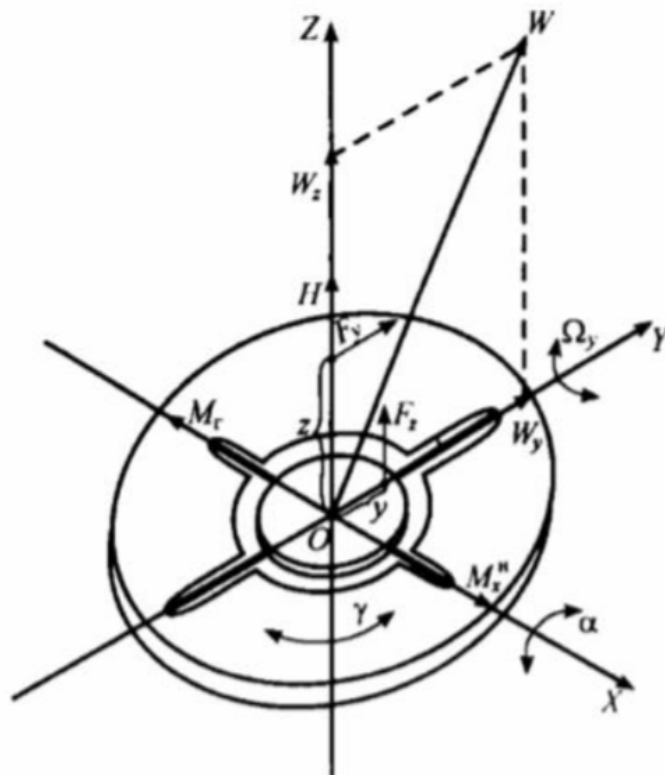


Рис. 2.3. Схема ММГ під дією лінійної вібрації.

Через похибку мікромеханічного гіроскопу знаходячи кутову швидкість Ω_y , тоді маючи лінійну вібрацію в площині YZ. Момент M_x^H , який буде мати місце через нерівножорсткістю підвісу і інерційними силами, які мають вплив на ротор черезвіброприскорення W , також має вплив як гіроскопічний момент $M_\Gamma = H\Omega_y$ навколо осі на виході OX.

З огляду на рис. 2.3 маємо:

$$M_x^H = F_z y - F_y z, \quad (2.16)$$

$$\text{де } F_y = -mW_y;$$

$$F_z = -mW_z ;$$

$$y = mW_y / G_y ;$$

$$z = mW_z / G_z ;$$

m – маса ротора; W_y, W_z – віброприскорення в напрямку відповідних осей; G_y, G_z – жорсткості пружного підвісу в напрямку відповідних осей.

Записуємо (2.16) таким чином :

$$\begin{aligned} M_x^H &= -m^2 W_y W_z (1 / G_y - 1 / G_z) = -m W_y W_z (1 / \omega_{y0}^2 - 1 / \omega_{z0}^2) = \\ &= m W_y W_z \omega_{z0}^2 (1 - \omega_{z0}^2 / \omega_{y0}^2), \end{aligned} \quad (2.17)$$

де ω_{y0} , ω_{z0} – частоти власних коливань мікромеханічного гіроскопу в

напрямку відповідних осей.

Також розглянемо коефіцієнт нерівножорсткості підвісу:

$$K_{yz}^H = 1 - \omega_{z0}/\omega_{y0} \quad (2.18)$$

і розрахунок формули (2.17) буде мати вигляд:

$$M_x^H = (K_{yz}^H m W_y W_z) / \omega_{z0}^2. \quad (2.19)$$

За відповідних значень $\omega_{z0} = \omega_{y0}$, $M_x^H = 0$.

Наприклад, складові віброприскорень мають однакові частоти ω_b , але зміщені по фазі впливу ψ :

$$W_y = W_0 \sin \omega_B t; \quad W_z = W_0 \sin(\omega_B t + \psi),$$

де $W_0 = W_y = W_z$ – амплітуда віброприскорення.

Приведемо до наступного виду:

$$W_y W_z = W_0^2 [(1 - \cos^2 \omega_B) \cos \psi + \sin(2\omega_B t) \sin \psi] / 2, \quad (2.20)$$

тоді, маючи на увазі (2.19) можна зрозуміти, що мають місце постійна складова збурюючого моменту і складова на подвоєній частоті вібрації. У

формулі (2.20) врахуємо, де $\omega_B = \omega_{\alpha 0} / 2$ ($\omega_{\alpha 0}$ – частота власних коливань

мікромеханічного гіроскопуза осю на виході) бачимо резонансне збільшення моменту $M_x H$, тому що його частота зміни має значення частоти $\omega \alpha 0$.

Щоб зменшити вплив нерівножорсткості, треба мати на увазі нерівності:

$$M_r = H_0 \Omega_y \gg (K_{yz} H m W_0^2) / \omega_{z0}^2, \quad (2.21)$$

Тоді буде мати місце обмеження на коефіцієнт нерівножорсткості:

$$K_{yz} H \leq H_0 \Omega_y \omega_{z0}^2 / m W_0^2. \quad (2.22)$$

З виразу (2.22) маємо судження, що коефіцієнт нерівно-жорсткості має більше значення, якщо частота ω_{z0} має, але через невелику товщину

ротора, якщо мат на увазі діаметр не буде отримане значення ω_{z0} , тому що

ротор при дії значних вібраційних збурень деформується.

З формули (2.21) можна вивести обмеження за найбільшим значенням амплітуди вібрації:

$$W_0 \leq \omega_{z0} \sqrt{H_0 \Omega_y / K_{yz} H m} . \quad (2.23)$$

Для реальних параметрів мікромеханічного гіроскопу різниця в частотах ω_{y0} і ω_{z0} велика величина коефіцієнта нерівножорсткості близька до одиниці, через це збільшується вплив лінійної вібрації на похибки мікромеханічного гіроскопу.

Лінійна вібрація при коефіцієнті нерівножорсткості $K_{yz}^H \rightarrow 1$ може значно змінити вихідні (вторинні) коливання мікромеханічного гіроскопу. Також має значення, що збурюючий момент має частоту вторинних коливань

та його не можна не враховувати через фільтрацію сигналу мікромеханічного гіроскопу на виході.

Маючи на увазі, що $\omega_b < 0,5\omega_{\alpha 0}$ резонансного збільшення збурюючого

моменту, яке з'являється через нерівножорсткість підвісу, немає, тоді не треба рівножорсткість підвісу. Зрозуміло, що тоді вплив його нерівножорсткості можемо мати через відповідності :

$$M_x^H = H_0 \Omega_y \Omega_x, \quad (2.24)$$

де M_x^H визначається за виразом (2.19).

Також якщо, жорсткість пружних елементів за координатою β велика та чутливий елемент не робить коливання навколо осі y , тому рух чутливого елемента описується рівняннями (2.11) та (2.13). Саме так рівняння за координатою γ (2.13) показує первинні коливання чутливого елемента та

рівняння за координатою α (2.12) – вторинні коливання за умови впливу зовнішньої кутової швидкості.

Для вменшення впливу лінійної вібрації на сигнал мікромеханічного гіроскопу на виході треба :

- зменшити коефіцієнт нерівножорсткості підвісу у площині, яка перпендикулярна до осі вихідних (вторинних) коливань ротора;
- збільшити частоту власних коливань ротора (маючи на увазі методи фільтрації для бачення корисного сигналу);
- слідкувати за частотою вібраційних збурень, не нехтувати потребою бути менше половини частоти власних коливань мікромеханічного гіроскопу до осі на виході.

2.2 Розробка конструкції гіроскопу

Конфігурація ЧЕ гіроскопа показана на рис.2.3. Вона включає в себе ротор 1, недеформовані 2 і деформуються 3, 4 елементи підвісу з анкером 5, витравлені в кремнієвій пластині. За допомогою анкера ЧЕ з'єднаний з підкладкою (корпусом), на якій розташовані електроди ємнісного перетворювача переміщень, датчика сили контуру компенсації моментів сил інерції Коріоліса, а також статорні елементи гребінчастих структур електростатичного приводу. останні спільно з роторними структурами, розташованими на роторі, створюють вібраційний крутний момент навколо осі Z.

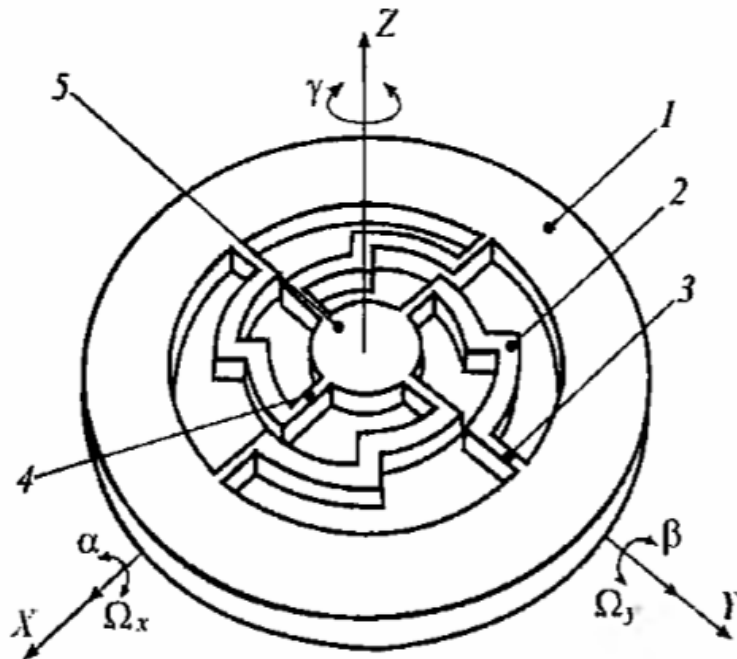


Рис. 2.3. Схема ЧЕ роторного МГ:

Дві пари пружних елементів 3 забезпечують з'єднання ротора з недеформованими елементами 2, які передбачаються абсолютно жорсткими, а дві пари пружних елементів 4 здійснюють з'єднання елементів підвісу 2 з анкером 5.

При повороті ротора навколо осі X всі пружні елементи, розташовані влодь неї, працюють на кручення, а розміщені вздовж осі Y - на вигин. При повороті ротора вздовж осі Y пружні елементи працюють однаково. При розворотах ротора навколо осі Z всі пружні елементи піддаються деформації вигину.

На рис.2.4 – 2.8 представлено тривимірну модель гіроскопа, розроблену у середовищі SolidWorks.

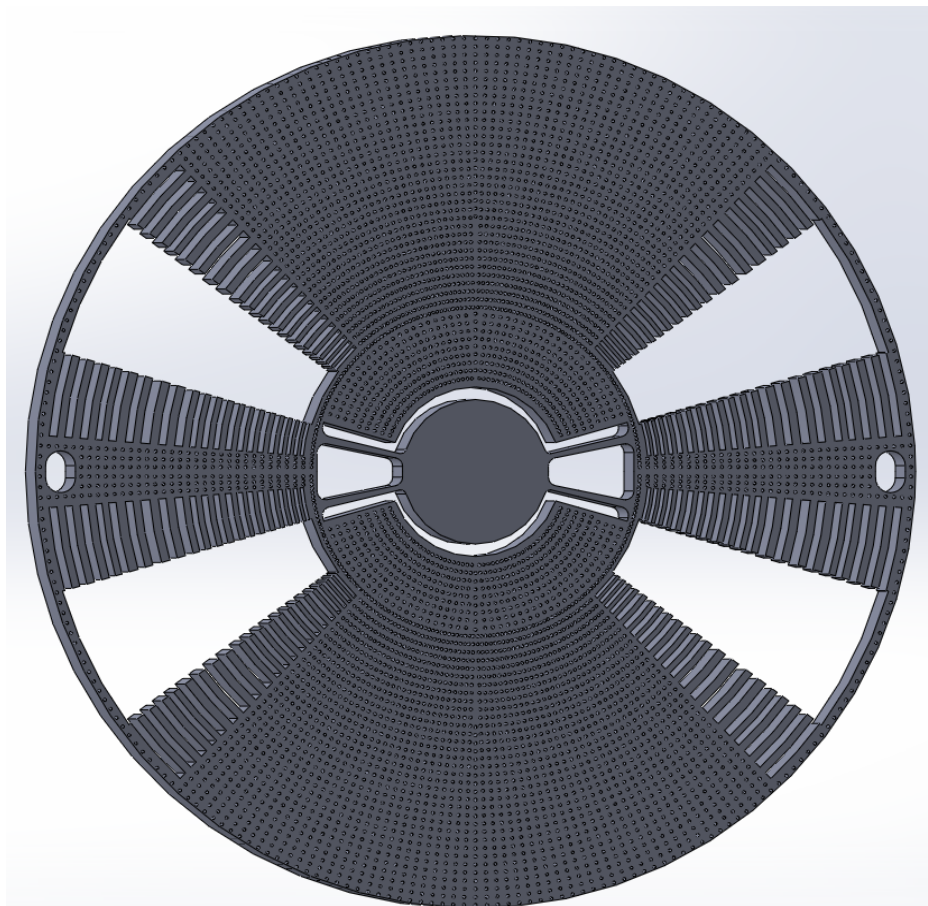


Рис.2.4 Мікромеханічний гіроскоп RR-типу

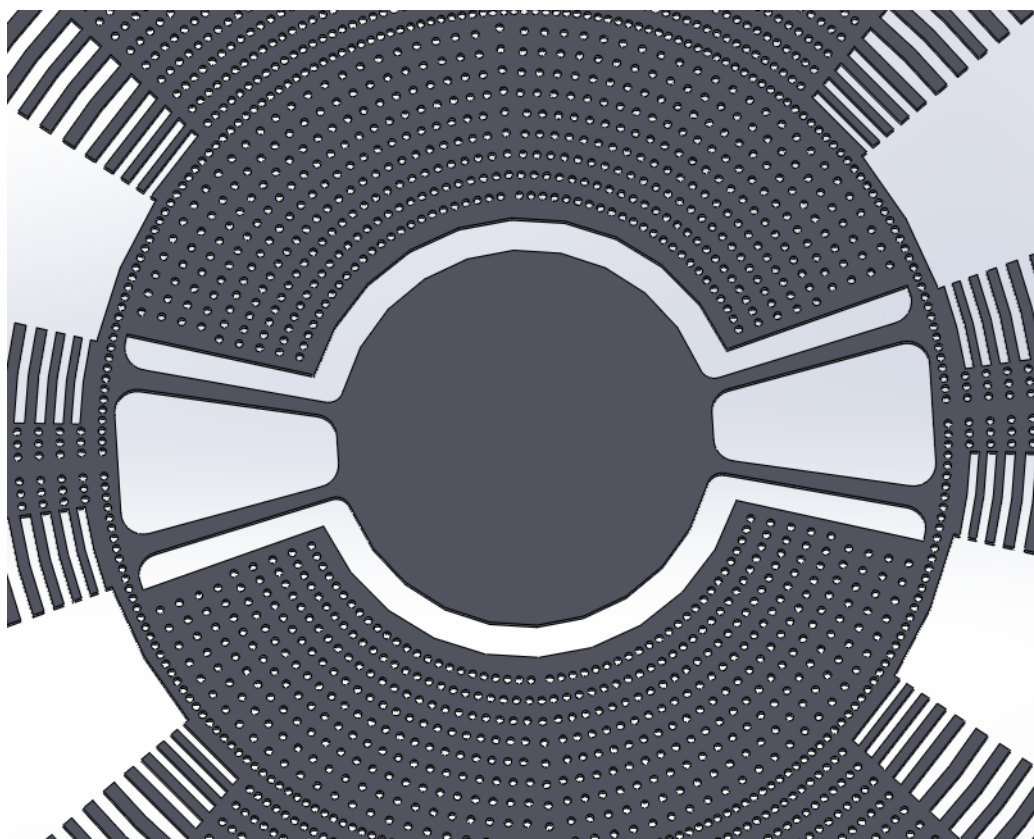


Рис.2.5 Торсіони підвісу

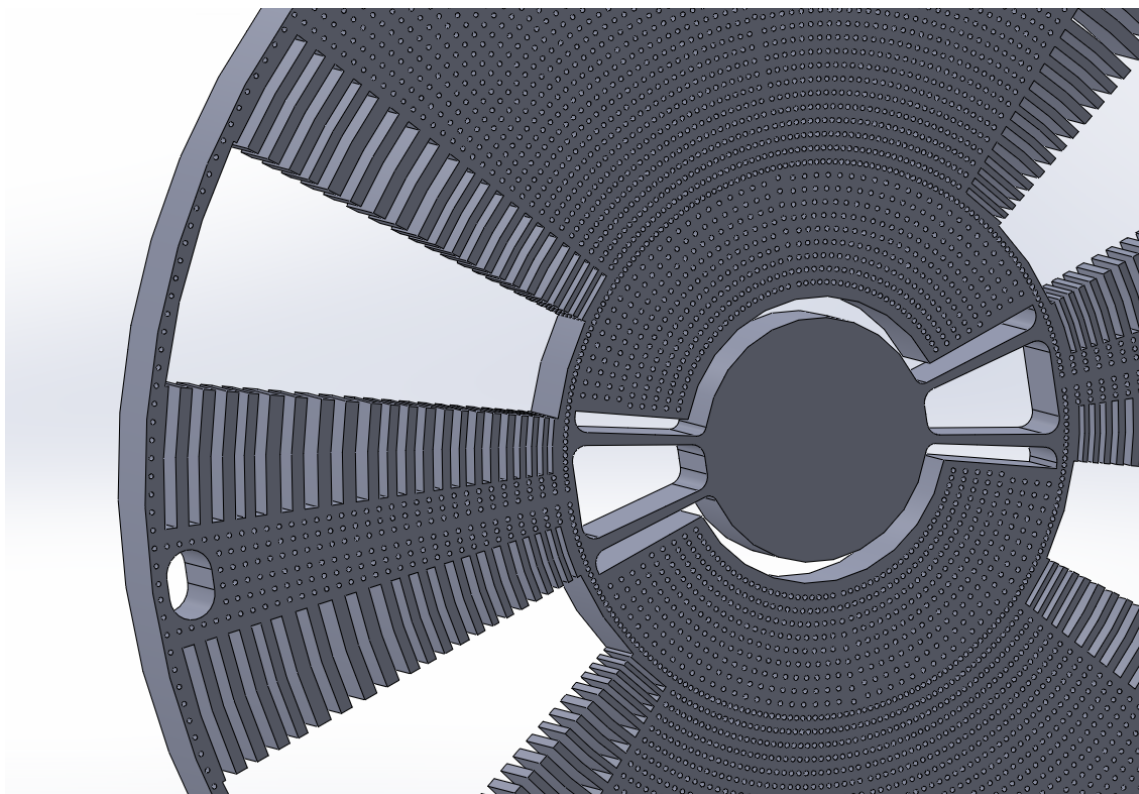


Рис.2.6 Мікромеханічний гіроскоп RR-типу

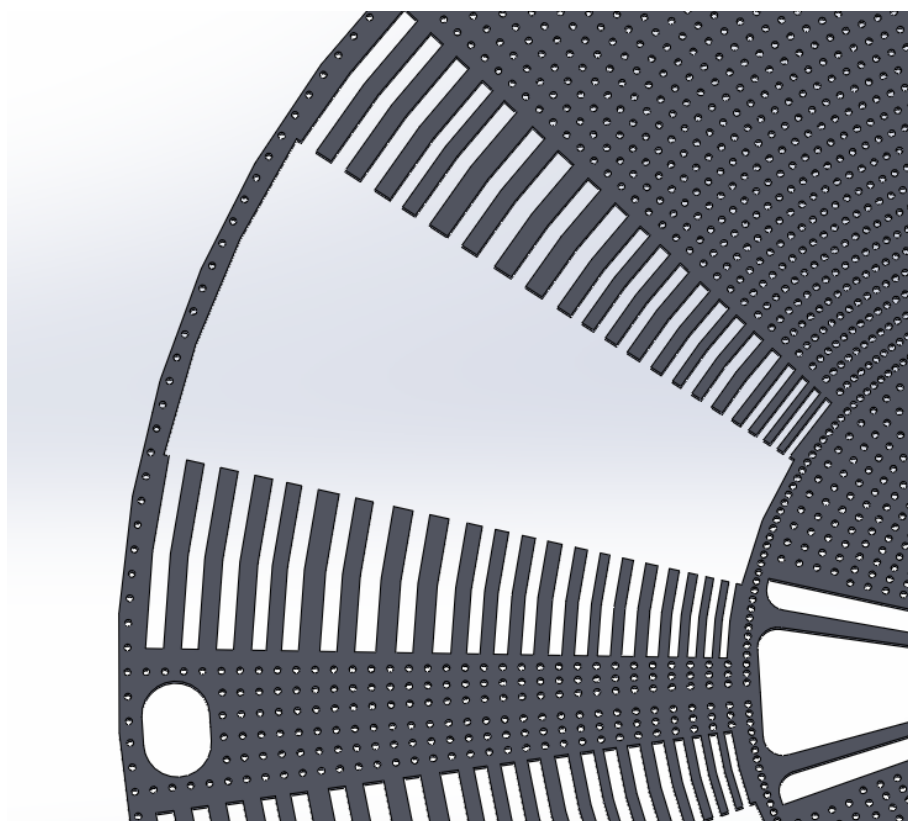


Рис 2.7 Гребінки приводу

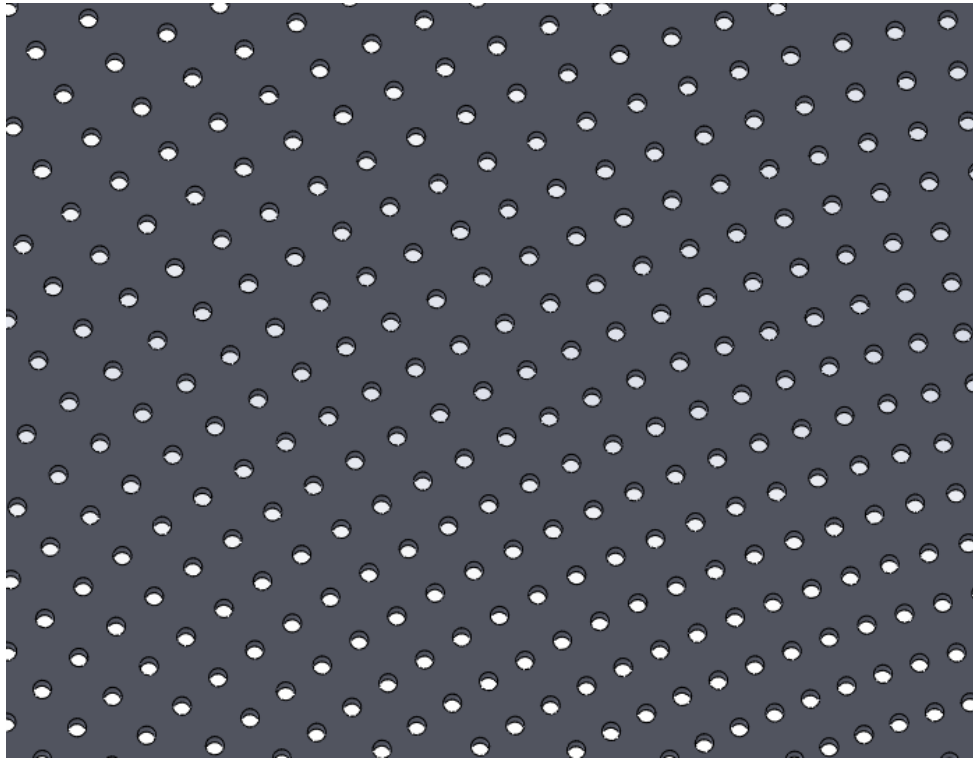


Рис.2.8 Вентиляційні отвори

На основі розробленої конструкції було розраховано основні конструктивні параметри гіроскопу.

2.3 Розрахунок конструктивних параметрів гіроскопу

Розроблена тривимірна модель дозволяє легко провести розрахунок необхідних параметрів для математичної моделі ММГ (2.12) та (2.13).

Мікроструктура витравлена з кремнієвої пластини на площині (100). Параметри кремнію: $E_{(100)} = 1,295 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; $G_{(100)} = 0,79 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; Ротор має параметри: $m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$; осьовий момент інерції $C_1 = 1525 \text{ кг м}^2$; екваторіальні моменти: $J_x \approx J_y = A_1 = 962 \text{ кг м}^2$. Ротор та пружні елементи (торсіони) підвісу мають товщину $c_n = 127,19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а ширина та довжина торсіонів відповідно, м: $b_{n1} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l_{T1} = 240 \cdot 10^{-3}$, $b_{n2} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l_{T2} = 240 \cdot 10^{-3}$.

Жорсткість кожного елемента та частота власних коливань:

$$G_{\gamma} = 34,31 \cdot 10^8 \text{ Н/м}; \quad \Omega_{\gamma 0} = 3,019 \cdot 10^{10} \text{ Гц.}$$

Жорсткість на кручення торсіонів:

$$G_{\text{кр } x} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Н*м}, \quad G_{\text{кр } y} = 1778,2 \text{ Н*м.}$$

Для руху у РЧ по будь-якій з координат α або β , при цьому ці два торсіони працюють на вигин:

$$G_{\alpha} = 6,7 \cdot 10^{10} \text{ Н*м}; \quad \Omega_{\alpha 0} \approx 1,0674 \cdot 10^{13} \text{ Гц};$$

$$G_{\beta} = 6,7 \cdot 10^{10} \text{ Н*м}; \quad \Omega_{\beta 0} \approx 1,0674 \cdot 10^8 \text{ Гц.}$$

Коефіцієнт демпфування був визначений за формулою:

$$k_d = (3\mu\pi R^4) / h_0^3 \quad (2.25)$$

$$k_d = (3 \cdot 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot 1,51^4 \cdot \pi) / (0,4 \cdot 10^{-3})^3 = 2,05 \cdot 10^6$$

Використовуючи розроблену тривимірну модель можна розрахувати максимальні кути відхилення первинних і вторинних коливань

$$\gamma_{\text{max}} = 2^\circ \text{ та } \alpha_{\text{max}} = 0,038^\circ$$

Маючи усі необхідні параметри чутливого елемента гіроскопа можна перейти до програмного моделювання.

3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІРОСКОПУ

Побудуємо програмну модель мікромеханічного гіроскопа RR типу за математичною моделлю (2.12) та (2.13) у середовищі MATLAB та SIMULINK. Схема програмного алгоритму представлена нижче на рис.3.1.



Рис. 3.1. Схема програмної моделі мікромеханічного гіроскопу RR типу

3.1 Програмна модель у середовищі MatLab

Пояснимо роботу окремих компонентів програмної моделі

Головною є керувальна програма **Upra.m**. Тут задаються розраховані параметри чутливого елемента гіроскопа та рух основи. Спочатку визначаються параметри гіроскопа, такі як коефіцієнт демпфування, маса, жорсткість підвісу, осьовий та екваторіальний моменти інерції та параметри електричного приводу. Рух основи моделюється у вигляді постійної та гармонічної складової. Їх параметри також задаються в керувальній програмі. В програмі реалізується процес інтегрування диференціальних рівнянь з використанням S-функції, взаємозв'язок окремих процедур моделі та вивід результатів у вигляді графіків.

Текст керувальної програми приведено нижче (Upra.m):

```
clc, clearall
globalcacbfafblzIy M0 lam
dtr=pi/180; rtd=180/pi;
%% Параметри чутливого елемента
ca=34.31e8; cb=6.7e10;
```

```

fa=2.05e6; fb=2.05e6;
M0=1*dtr;
lam=2*18000*2*pi;
Iz=1525; Ix=962; Iy=577;
H=Iz*M0*lam;

%% Параметри руху основи
U0=0*dtr;
Um=1e-2*dtr;
w=50*2*pi;

%% Интегрирование
Tk=0.02; y0=[0 0 0 0];
Hi=1e-4;
sim('MMG')
t=tout; A1=yout(:,1); Bt=yout(:,3);
figure(1)
plot(t,A1,'linewidth',3),grid
xlabel('Час, с');
ylabel('Кут, град. ');
legend('\alpha')
set(gca,'FontSize',14);
figure(2)
plot(t,Bt,'linewidth',3),grid
xlabel('Час, с');
ylabel('кут, град');
legend('\beta')
set(gca,'FontSize',14);

```

Чисельне інтегрування проводиться у середовищі Matlab Simulink з використанням S-функції **prCh.m**. Ця стандартна процедура дозволяє об'єднати інтерфейс Simulink з можливістю формування функції правих частин у вигляді програмного коду у Matlab.

Приведемо текст **prCh.m**нижче.

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] =
prCh(t,x,u,flag,H,y0)
globalcacbfafbIzIy M0 lam
switchflag,
case 0,
    [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes(y0);
case 1,
    sys=mdlDerivatives(t,x,u,H);
case 2,
    sys=mdlUpdate(t,x,u);
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case 4,
    sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
case 9,
    sys=mdlTerminate(t,x,u);
otherwise
    DASTudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag',
    num2str(flag));
end
function
[sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes(y0)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 4;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 4;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = y0;
str = [];
ts = [0 0];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
functionsys=mdlDerivatives(t,x,u,H)
globalcacbfafbIzIy M0 lam
sys(1)=x(2);
sys(2)=(M0*sin(lam*t)-ca*x(1)-fa*x(2))/Iz;
sys(3)=x(4);
sys(4)=(H*u-(cb+(Iz-Iy)*x(2)^2)*x(3)-fb*x(4))/Iy;

functionsys=mdlUpdate(t,x,u)

sys = [];

functionsys=mdlOutputs(t,x,u)
sys = [x];

functionsys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)

```

```

sampleTime = 1;
sys = t + sampleTime;

function sys=mdlTerminate(t,x,u)
sys = [];

```

3.2 Імпорт тривимірної моделі ММГ до Simscape Multibody

Програмне доповнення Simscape Multibody дозволяє візуалізувати моделювання ММГ імпортувавши тривимірну модель приладу до Simulink. Це дозволяє контролювати хід експерименту і аналізувати динаміку.

Імпортуємо створену у SolidWorks 3D модель гіроскопа до середовища MatLab – Simulink, використовується плагін SimscapeMultibodyLinkPlug-In. Отримана модель у середовищі Simulink представлено на рис.3.2, а схема імпортованої тривимірної моделі окремо на рис.3.3.

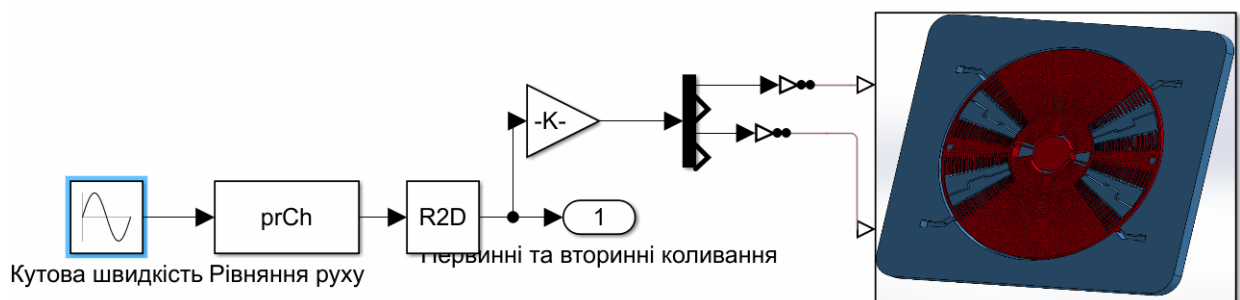


Рисунок 0.10. Модель ММГ Simulink

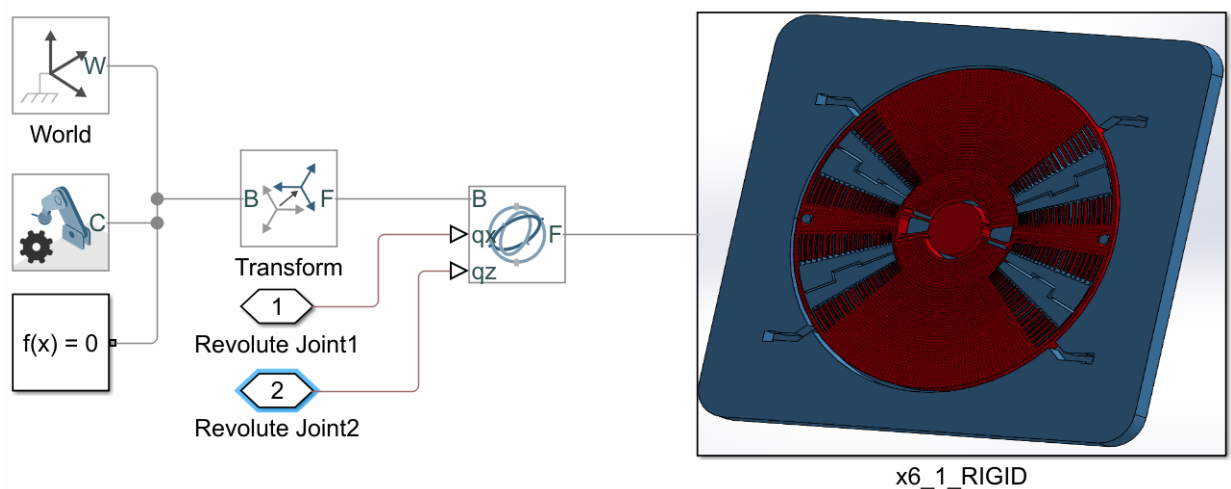


Рисунок 2.11 Імпортована модель Simscape Multibody

3.2 Результати моделювання гіроскопу

Створена програмна модель дозволяє проводити різноманітні дослідження. Перевіримо модель на адекватність. При відсутності зовнішніх збурень ротор має здійснювати лише первинні коливання з заданою амплітудою та частотою. Графік первинних коливань представлено на рис.3.4.

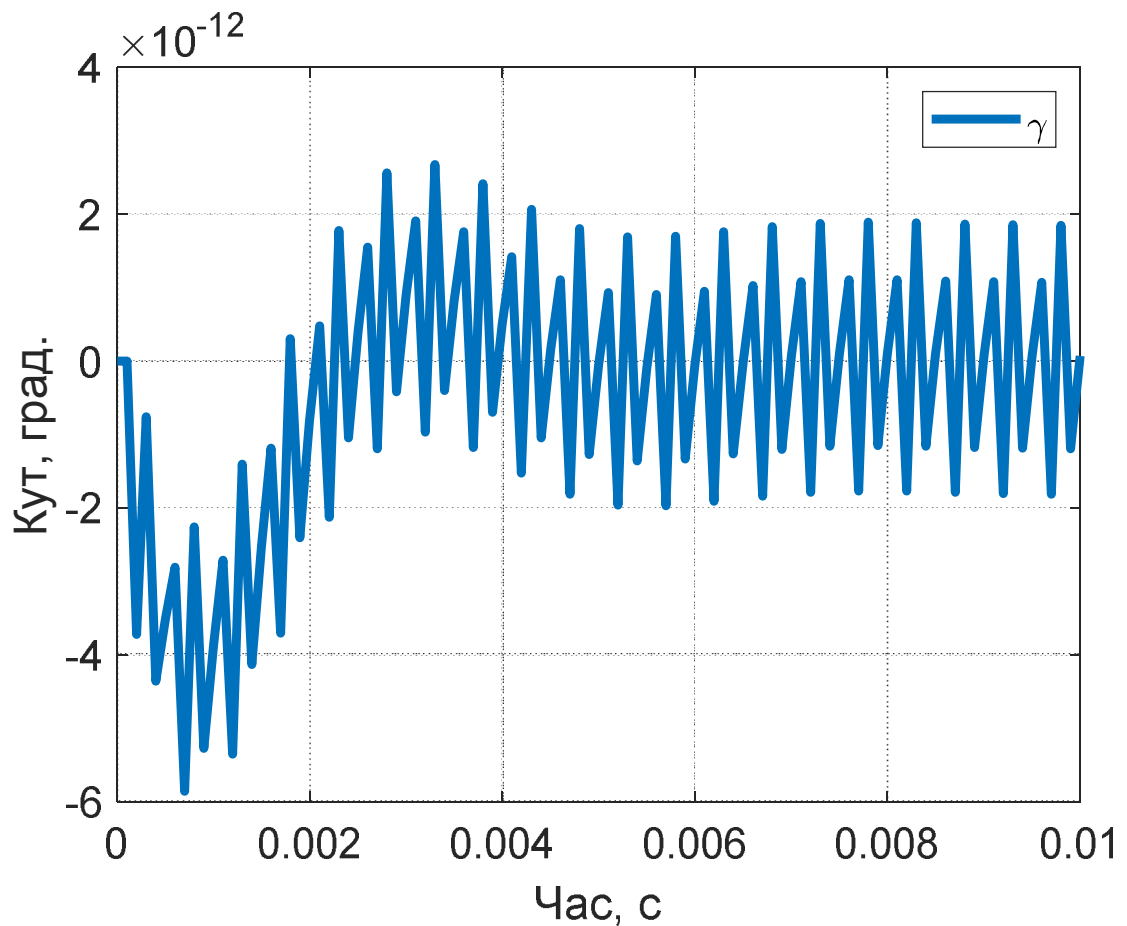


Рис.3.4 Графік первинних коливань.

Характер первинних коливань має змінюватись в залежності від закону руху основи. Спочатку було проведено серію експериментів, що імітували динаміку ротора ММГ при обертанні основи з постійною кутовою швидкістю навколо осі чутливості. При такому русі будуть виникати вторинні коливання, що призведуть до відхилення ротора на певний усталений кут як показано на рис.3.5.

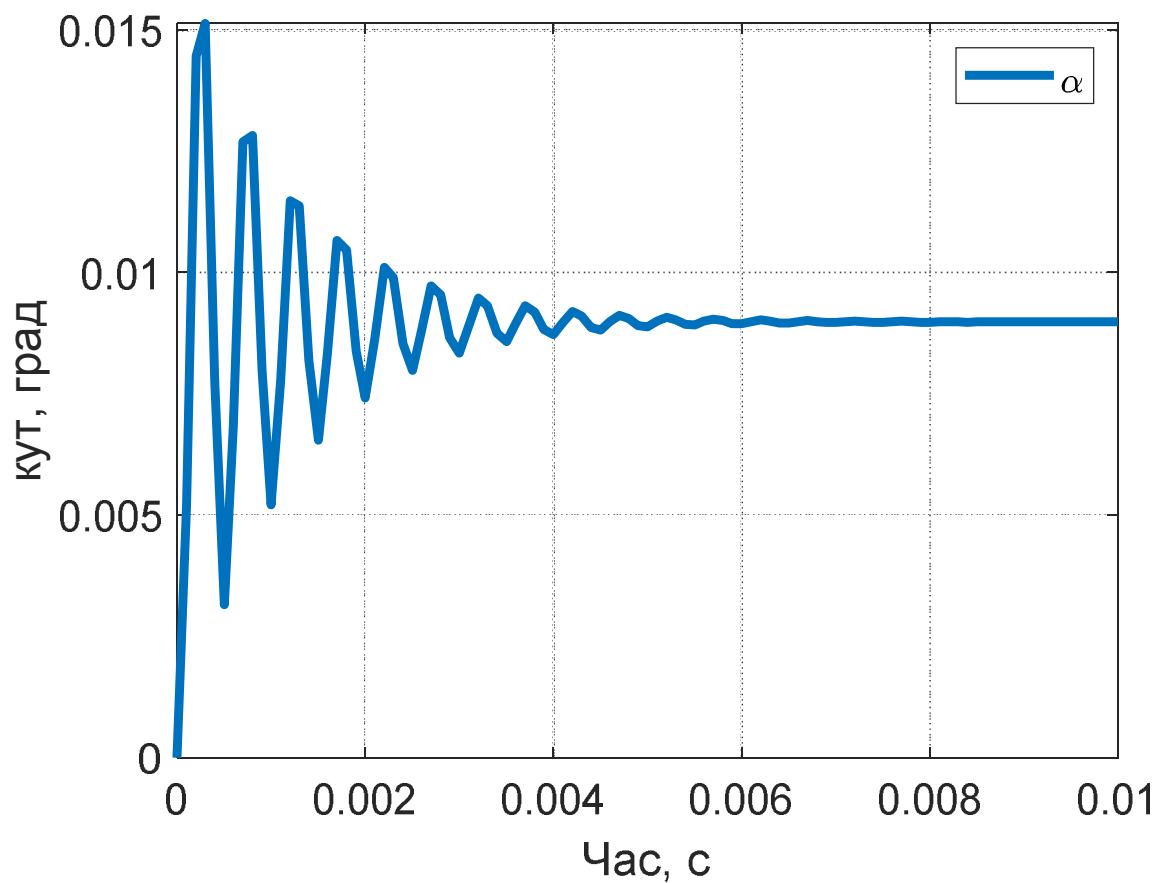


Рисунок 3.5 Вторинні коливання ротора

Це усталене значення має бути пропорційне кутовій швидкості основи. Проведемо серію експериментів за різного значення постійної кутової швидкості основи. Результати занесено до табл.2 та представлені на рис. 3.6.

Табл.2 Дані для графіку постійної кутової швидкості.

U_0 , град./с	Усталене значення вторинних коливань, град.
0	0
3	0,0002696
6	0,0005391
9	0,0008087
15	0,001348
18	0,001617

21	0,001887
24	0,002157
27	0,002426
33	0,002965
36	0,003235
39	0,003504
42	0,003774
45	0,004044
50	0,004493

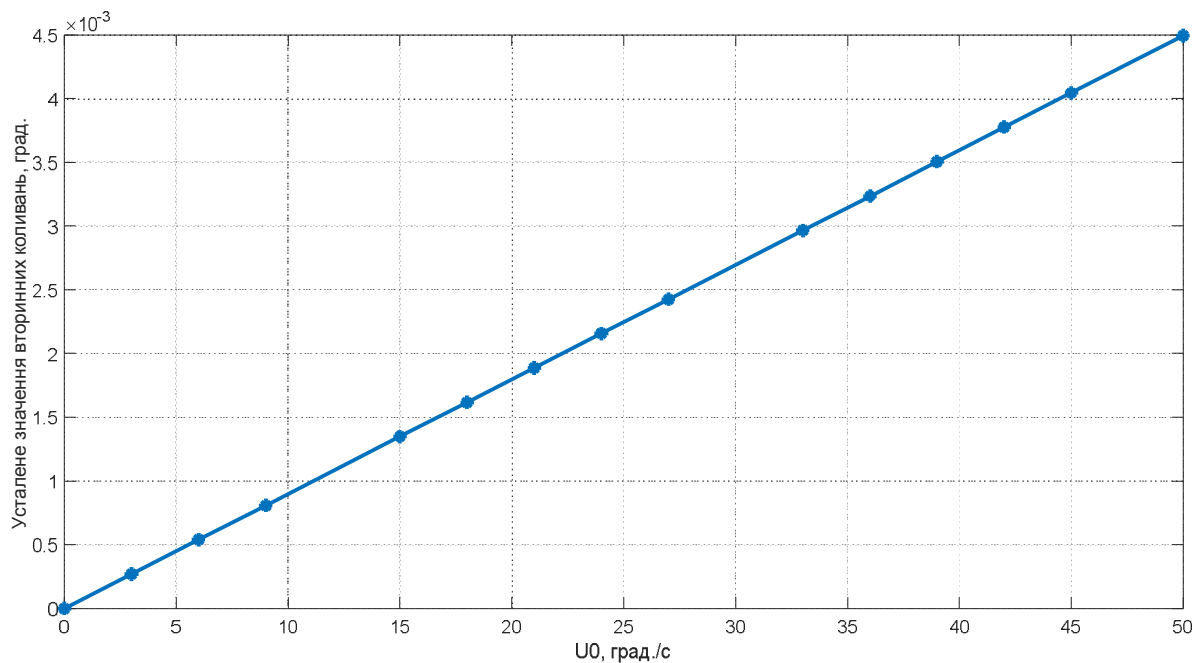


Рис.3.6 Постійна кутова швидкість.

Моделювання показало зростання зміщення значення усталених коливань в залежності від постійної кутової швидкості. Проте навіть при максимальній кутовій швидкості, усталене значення вторинних коливань не перевищує гранично допустимі.

Наступною серію експериментів було моделювання гармонічного руху основи з певною амплітудою кутової швидкості. В цьому випадку ротор

здійснює гармонійні кутові коливання навколо положення рівноваги, як показано на рис.3.7.

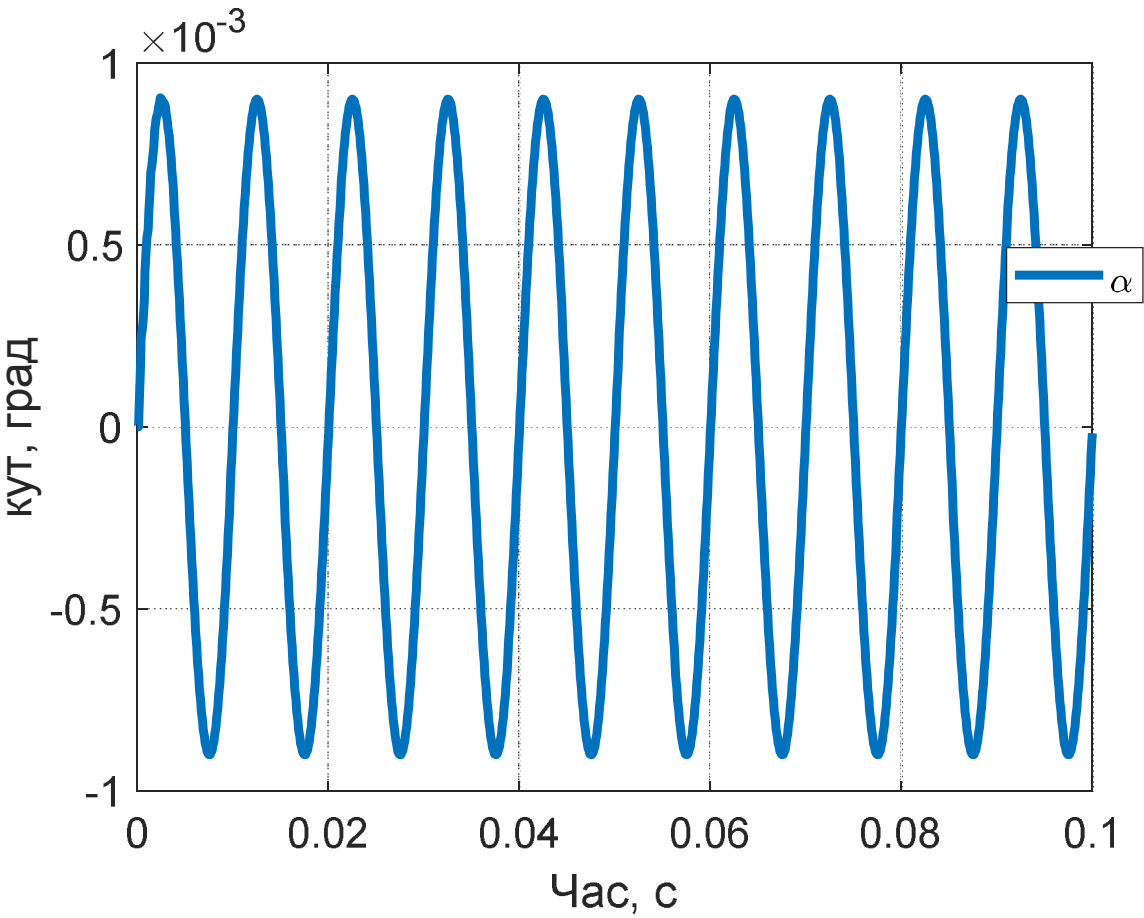


Рисунок 3.7 Вторинні коливання при гармонічному русі основи

Амплітуда цих коливань пропорційна амплітуда кутової хитавиці. Результати представлені в табл.3 та на рис.3.7.

Табл.2 Дані експерименту при гармонічній кутовій швидкості

Ум, град./с	Усталене значення вторинних коливань, град.
0	0
0,0001	9e-9
0,1	9e-6
1	9.007e-5
5	0.0004503

10	9.0068e-4
30	2.7020e-3
50	4.5034e-3

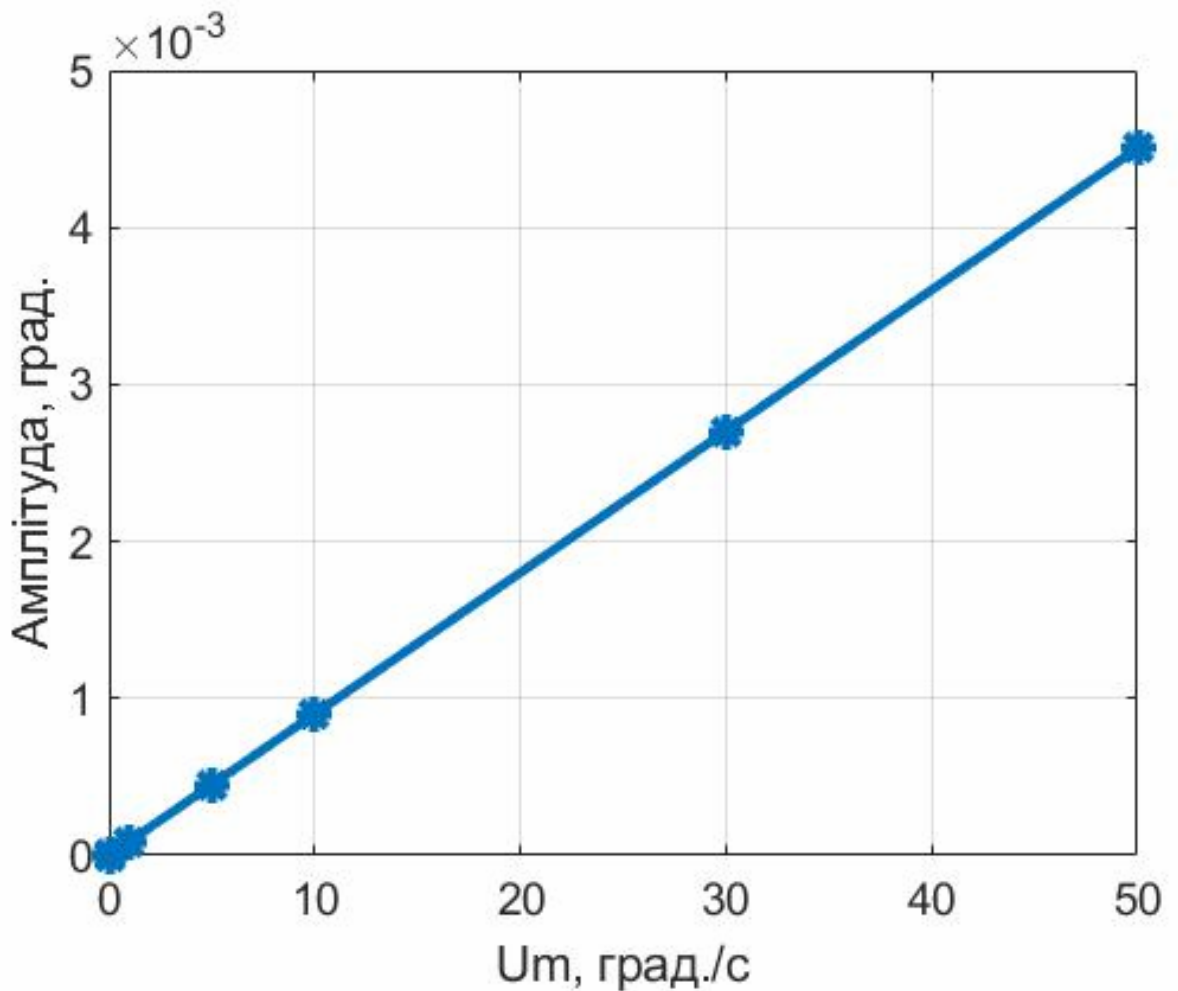


Рис.3.7 Гармонічна кутова швидкість.

З рис.3.7 видно, що навіть при хитавиці з великою амплітудою, вторинні коливання також не перевищують гранично допустиме значення.

Ротор мікромеханічного гіроскопа RRтипу працює адекватно при різному русі основи

ВИСНОВОК

В роботі досліджувався мікромеханічний гіроскоп RR типу.

У аналізі були використані типи мікромеханічних гіроскопів, їх основні характеристики, технології виробництва.

Була складена математична модель мікромеханічного гіроскопа та розроблена модель чутливого елемента у середовищі SolidWorks, також були розраховані основні параметри. У програмній моделі, яка була побудована у середовищі MatLab Simulink, було використано тривимірну модель мікромеханічного гіроскопу. Завдяки цьому були проведені дослідження гіроскопу.

У ході програмного моделювання було проаналізовано адекватність моделі. Результати моделювання співпали з результатами описаними в літературі. Було проаналізовано, що використовувати схеми дозволяє повністю компенсувати вплив гармонічного прискорення на рух інерційних мас мікромеханічного гіроскопу. Також використання таких диференціальних схем побудови мікромеханічного гіроскопу дає право використовувати його як датчик прискорення.

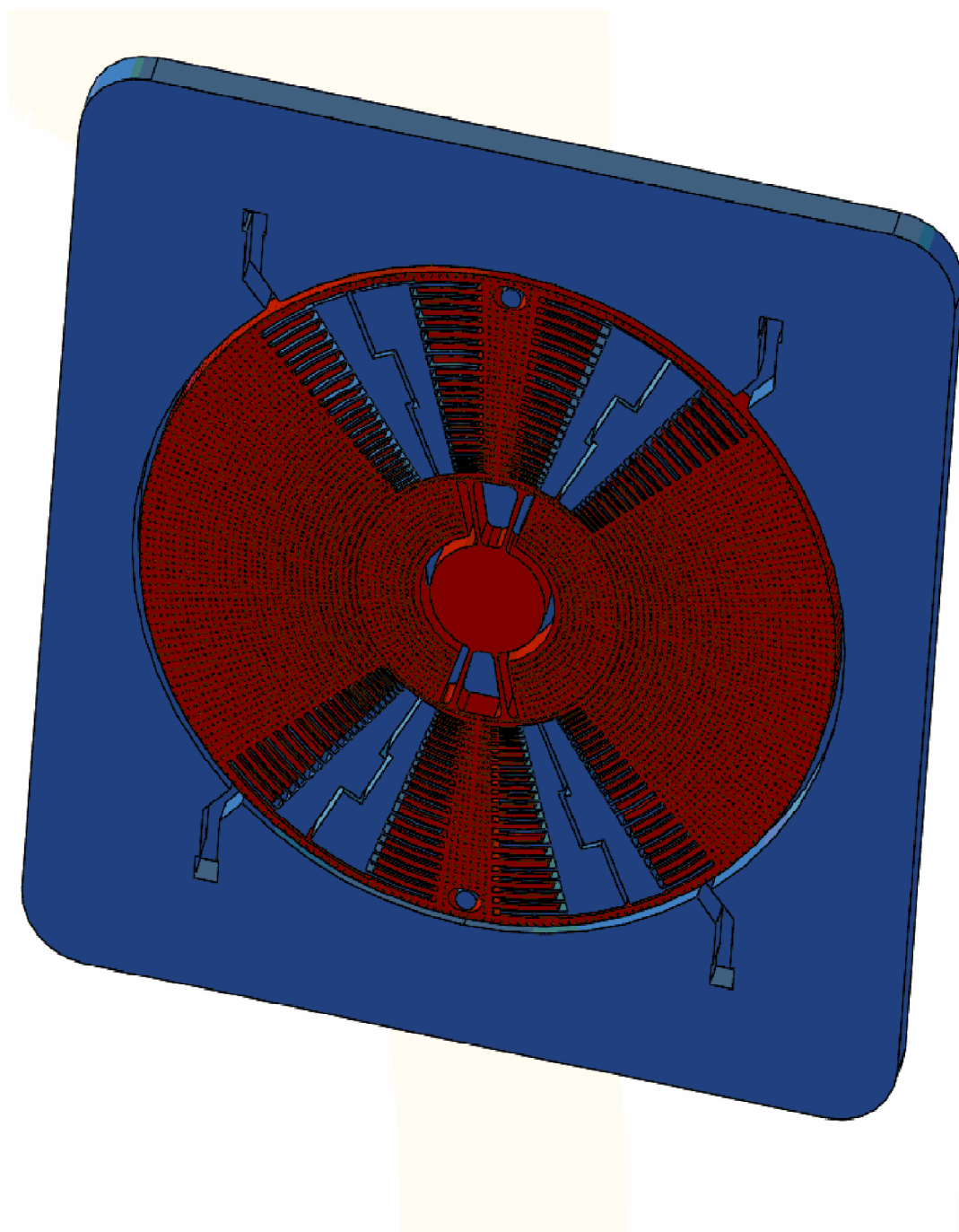
Результати досліджень пройшли апробацію на науково практичних конференціях «Погляд у майбутнє приладобудування 2020».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Евстифеев М.І. Чутливі елементи гіроскопічних систем.
2. Лазарев Ю.Ф. Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації: підруч. Ю. Ф. Лазарев, П. М. Бондар – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 644с.
3. Распопов В.Я. Мікромеханічні прилади: навчальний посібник. – М.: Машинобудування, 2007.- 400с.
4. Сапегін О.М. Сучасний стан та тенденції алгоритмічного забезпечення БІСО.
5. М.И. Евстифеев. Методи проектування конструкцій мікромеханічних гіроскопів.
6. С. Сисоева. Тенденції ринку High-end MEMС-датчиків інерції.
7. Інерціальні навігаційні системи. Розділ 2.
URL: <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/11011/9/Гл5.pdf>
8. Матвеев В. В., Серегин С. И., Лихошерст В. В. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ RR-ТИПА. 2012. Системы ориентации, стабилизации и навигации.

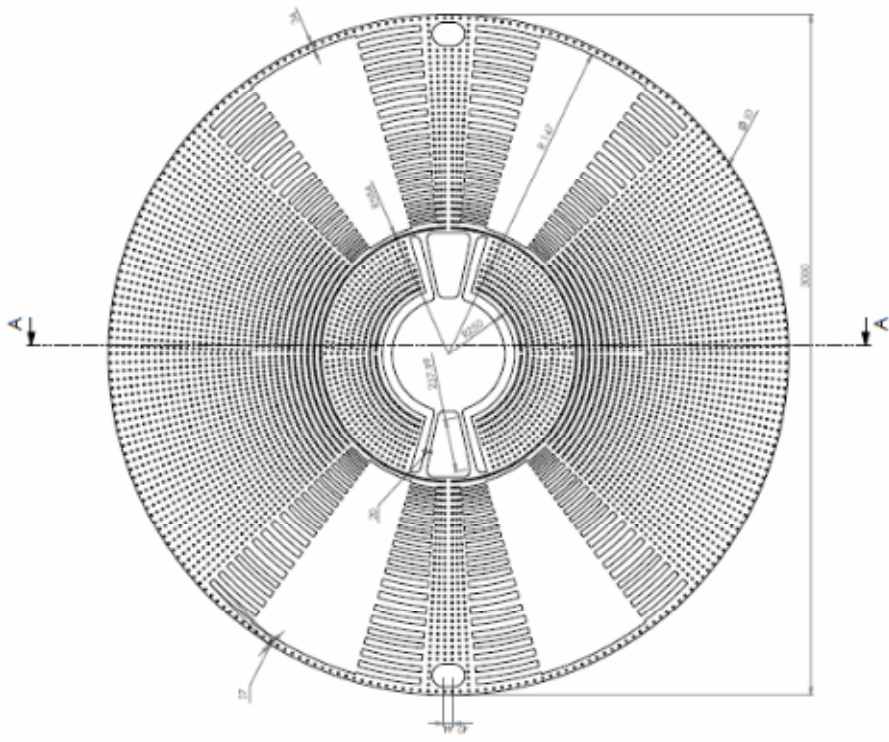
Тривимірна модель ММГ RR-типу

ДОДАДОК А



[illegible]

ПТ-6108.1730.002



A-A

- 1. Чертеж для сборки
- 2. Эксплуатационный чертеж
- 3. Аварийный чертеж
- 4. Эксплуатационный чертеж

ПТ-6108.1730.002		Исполнитель		Проверен		Утвержден	
Исполнитель	М.И.Смирнов	Проверен	В.И.Смирнов	Утвержден	В.И.Смирнов	Исполнитель	В.И.Смирнов
Исполнитель	М.И.Смирнов	Проверен	В.И.Смирнов	Утвержден	В.И.Смирнов	Исполнитель	В.И.Смирнов
Исполнитель	М.И.Смирнов	Проверен	В.И.Смирнов	Утвержден	В.И.Смирнов	Исполнитель	В.И.Смирнов
Исполнитель	М.И.Смирнов	Проверен	В.И.Смирнов	Утвержден	В.И.Смирнов	Исполнитель	В.И.Смирнов

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

